

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
для виконання лабораторних робіт
з дисципліни

ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

*(для студентів 1, 2 курсів денної, 2 курсу заочної форм навчання за
напрямом підготовки 6.050701 – Електротехніка та електротехнології
та слухачів другої вищої освіти
зі спеціальності «Електротехнічні системи електроспоживання»)*

**Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2016**

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Технологія виробництва електроенергії» (для студентів 1, 2 курсів денної, 2 курсу заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.050701 – Електротехніка та електротехнології та слухачів другої вищої освіти зі спеціальності «Електротехнічні системи електроспоживання») / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад.: В. А. Маляренко, С. І. Доценко, І. О. Темнохуд. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016 – 59 с.

Укладачі: д-р техн. наук **В. А. Маляренко**
канд. техн. наук. **С. І. Доценко**
І. О. Темнохуд

Рецензенти: доц. Д. С. Шимук, доц. В. М. Гаряжа

*Рекомендовано кафедрою електропостачання міст,
протокол № 3 від 27.11.2014 р.*

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	4
ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ З ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ	5
ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ПО ОФОРМЛЕННЮ ЗВІТУ ПО ЛАБОРАТОРНІЙ РОБОТІ.....	6
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1. ВИВЧЕННЯ ПРИНЦИПУ ДІЇ ТА БУДОВИ ЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРІВ.....	7
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 ВИВЧЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРІВ	12
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СТАТИЧНИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ	19
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4 ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ	25
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5 ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИС- ТИК ГАЛЬВАНІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ	38
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6 ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИ- СТИК Li – ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ	44
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7 ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЄМНІСНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ	50
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8 ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИС- ТИК МЕХАНІЧНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ	55

ПЕРЕДМОВА

Метою викладання навчальної дисципліни є систематизація знань про традиційні та альтернативні технології виробництва електричної енергії, загальні характеристики джерел електричної енергії.

Основними завданнями вивчення дисципліни є опанування знаннями з питань загальної енергетики, методами державного регулювання енергетичної діяльності комунальних та виробничих підприємств, побутової сфери, енергозбереження.

У результаті вивчення навчальної дисципліни студенти повинні:

знати:

методи державного регулювання енергетичної діяльності комунальних та виробничих підприємств, побутової сфери, традиційні та альтернативні технології виробництва електричної енергії, загальні характеристики джерел електричної енергії.

вміти:

оцінювати енергетичну та економічну ефективність паливно-енергетичних ресурсів, а також екологічні наслідки використання електричної енергії комунальними підприємствами.

мати компетентності:

брати участь у розробці та впровадженні сучасних методів, засобів й технологій виробництва електричної енергії; підвищувати фаховий рівень за рахунок опанування новітніх методів виробництва електричної енергії; аналізувати результати експериментальних досліджень застосування альтернативних джерел енергії та надавати практичні рекомендації щодо їх використання; прогнозувати напрямки застосування альтернативних джерел електричної енергії.

ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ З ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Для успішного виконання лабораторних робіт ці методичні вказівки і рекомендована література повинні бути вивчені студентами до приходу на заняття. За день до виконання лабораторної роботи група, за узгодженням з викладачем, зобов'язана прибути в лабораторію для ознайомлення з робочими місцями і приладами, що використовують у процесі досліджень.

При виконанні лабораторних робіт треба строго виконувати правила техніки безпеки:

1. Перед набором схеми необхідно переконатися, що комутаційний апарат, який подає напругу, виключений.
2. Після того, як схема зібрана, ще раз переконатися, що всі з'єднання зроблені правильно, звірити монтаж з принциповою схемою. Запам'ятати, які відкриті частини схеми або апарат будуть знаходитися під напругою при проведенні досліджень.
3. Включати напругу слід після перевірки схеми керівником і одержання на це його дозволу.
4. Не торкатися струмоведучих частин, що знаходяться під напругою.
5. Усі приєднання приладів і зміни в схемах виконувати тільки після відключення відповідних частин схеми від джерела живлення.
6. При виникненні яких-небудь неполадок у роботі схеми треба негайно відключити неї від джерела живлення і сповістити керівника.
7. Особливу обережність слід дотримувати при роботі зі схемами, в яких присутні великі ємності або індуктивності.
8. Після закінчення роботи виключити джерело живлення, привести робоче місце в порядок і здати його керівнику.

До виконання лабораторних робіт студенти допускаються тільки після вивчення правил техніки безпеки при роботі в лабораторії і відповідному розписі в журналі техніки безпеки.

Після виконання лабораторної роботи кожен студент складає звіт за встановленою формою і захищає його у складі бригади або індивідуально.

ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ПО ОФОРМЛЕННЮ ЗВІТУ ПО ЛАБОРАТОРНІЙ РОБОТІ

Звіт треба складати відповідно до загальних методичних указівок з оформлення звітів щодо лабораторних робіт, що виконують на кафедрі «ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ МІСТ». Він повинен включати:

1. Титульний аркуш з назвою лабораторної роботи, прізвища й ініціалів студента, групи, дати виконання роботи.
2. Короткий опис мети і змісту роботи.
3. Принципові схеми.
4. Таблиці з результатами вимірів.
5. Необхідні розрахунки.
6. Графіки й залежності, що отримані в результаті виконання роботи.
7. Висновки за отриманими результатами.

Принципові схеми й рисунки слід виконувати відповідно до вимог ЄСКД і державних стандартів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1.

ВИВЧЕННЯ ПРИНЦИПУ ДІЇ ТА БУДОВИ ЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРІВ

1 МЕТА РОБОТИ

Ознайомлення з принципом дії та конструктивними особливостями електричних генераторів. Вивчення конструкції генераторів змінної та постійної напруги.

2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Перший **магнітоелектричний генератор** виготовив 4 листопада 1831 професор Лондонського Королівського інституту (Royal Institution) Майкл Фарадей (Michael Faraday, 1791-1867). Генератор складався з подковоподібного постійного магніту і мідного диска, що обертається між магнітними згідно (рис. 1). При обертанні диска між його віссю і краєм індиціювалась постійна ЕРС. За таким же принципом влаштовані більш досконалі уніполярні генератори, що знаходять застосування (хоча відносно рідко) і в сьогоdnішній час.

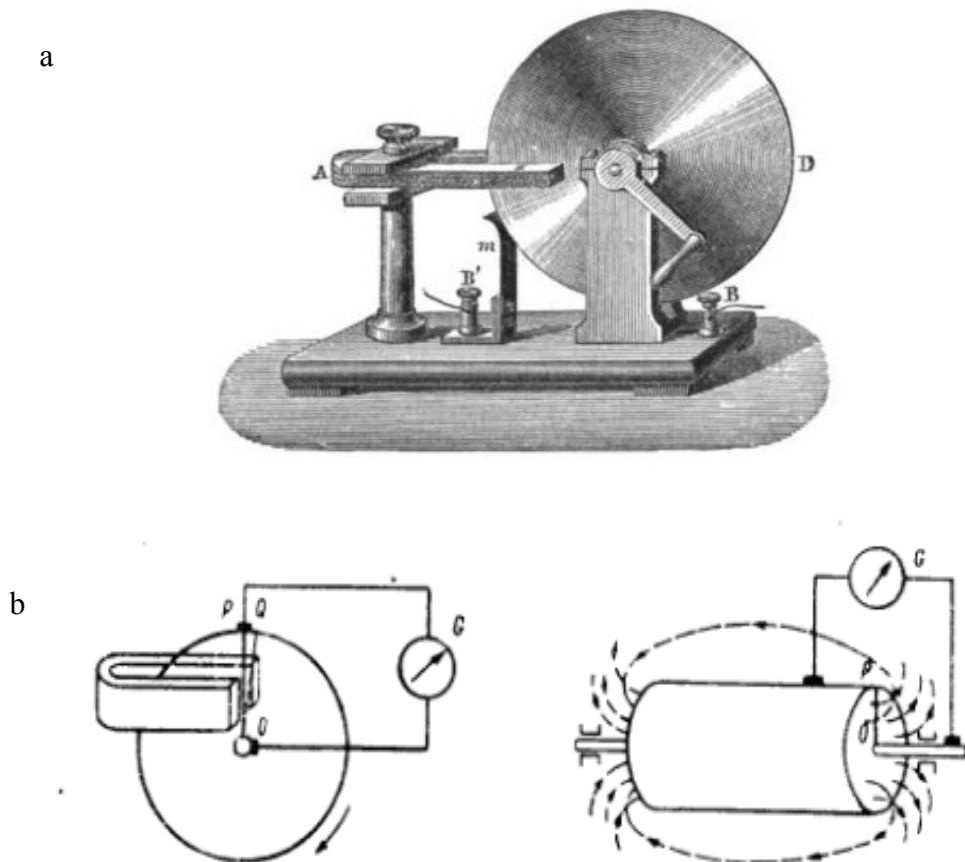


Рисунок 1 – Принцип устрою уніполярного генератора Майкла Фарадея:

a) – зовнішній вигляд генератора; b) – принцип дії генератора

Уніполярна індукція. На електрони, що знаходяться в диску, діє сила Лоренца, що є векторним добутком напруженості магнітного поля і швидкості переміщення електрона разом з провідником у результаті обертання диска. Сила ця спрямована вздовж радіуса диска. В результаті при обертанні диска виникає ЕРС між його центром і краєм.

На відміну від інших електричних машин, такий генератор має:

- надзвичайно низьку ЕРС (від часток до одиниць вольт) при низькому внутрішньому опорі і великому струмі;

- рівномірність одержуваного струму, відсутність необхідності комутувати його колектором ротора, або випрямляти отриманий іншими машинами змінний струм зовнішніми комутуючими або електронними приладами;

- великі власні втрати енергії через зворотні струми, що протікають по диску і марно його нагрівають. Ця проблема частково вирішується в конструкції двигунів і генераторів з рідким струмознімачем, що проводить струм по всьому периметру диска;

- досліди з двома дисками, що обертаються назустріч один одному і торкаються один одного, показали кращі результати.

Через рік після вищеописаного досліджу Фарадея, 3 вересня 1832 паризький механік Іполит Пікс (Hippolyte Pixii, 1808-1835) виготовив на замовлення і під керівництвом основоположника електродинаміки Андре Марі Ампера (Andre Marie Ampere, 1775-1836) генератор з магнітом, що обертається вручну, як у Фарадея, (рис. 5). У якірної обмотки генератора Пікса індукується змінна ЕРС. Для випрямлення одержуваного струму до генератора спочатку змонтували відкритий ртутний комутатор, що перемикає полярність ЕРС при кожному півоберту ротора, але незабаром він був замінений більш простим і безпечним циліндричним щітковим колектором, наданим на рисунку 2.

Генератор, який був побудований за принципом Пікса, вперше застосував в 1842 році на своєму заводі в Бірмінгемі (Birmingham) для електроживлення гальванічних ванн англійський промисловець Джон Стівен Вульріч (John Stephen Woolrich, 1790-1843), використавши в якості привідного двигуна парову машину потужністю одна кінська сила (735 Вт). Напруга його генератора становила 3 V, номінальний струм – 25 А і К.К.Д. – близько 10%.

Такі ж, але більш потужні, генератори швидко почали впроваджуватися і на інших гальванічних підприємствах Європи. У 1851 році німецький військовий лікар Вільгельм Йозеф Зінштеден (Wilhelm Josef Sinstden, 1803-1891) за-

пропонував використовувати в індукторі замість постійних магнітів електромагніти і живити їх струмом від меншого допоміжного генератора; він же / виявив, що К.К.Д. генератора збільшиться, якщо сталевий сердечник електромагніту виготовити не масивним, а з паралельних дротів. Однак ідеї Зінштедена став реально використовувати тільки в 1863 році англійський електротехнік-самоучка Генрі Уайльд (Henry Wilde, 1833-1919), який запропонував серед інших нововведень насадити машину-збудник (англ. Excitatrice) на вал генератора.

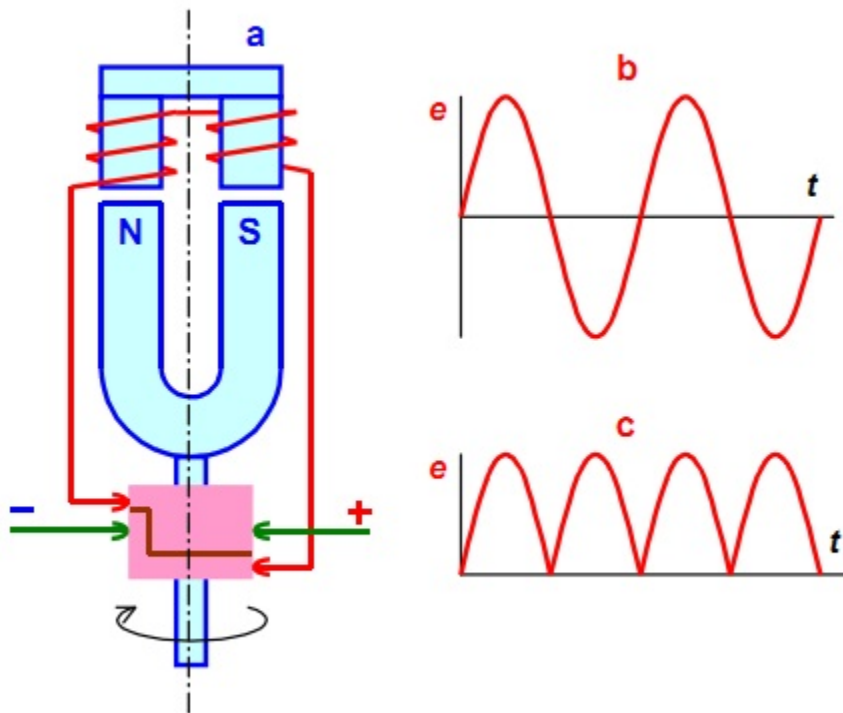


Рисунок 2 – Принцип устрою магнітоелектричного генератора Іполита Пікса (а), графік індукованої ЕРС (b) і графік одержуваної за допомогою колектора пульсуючої постійної ЕРС (с). Рукоятка і конусна передача не показані

Найважливішим удосконаленням **генераторів постійного струму** стало їх **самозбудження**, принцип якого запатентував в 1854 році головний інженер державних залізниць Данії Сьорен Хьерт (Soren Hjorth, 1801-1870), але не знайшло в той час практичного застосування. У 1866 році цей принцип знову відкрили незалежно один від одного кілька електротехніків, в тому числі вже згаданий Г. Уайльд, але широко відомим він став в грудні 1866 року, коли німецький промисловець Ернст Вернер фон Сіменс (Ernst Werner von Siemens, 1816-1892) застосував його у своєму компактному і високоефективному генераторі. 17 січня 1867 року в Берлінській академії наук була прочитана його знаменита доповідь про динамоелектричні принципи (про самозбудження).

Самозбудження дозволило відмовитися від допоміжних генераторів збудження (від збудників), що зумовило можливість вироблення набагато більш дешевої електроенергії у великих кількостях. З цієї причини рік 1866 часто вважають роком зародження електротехніки сильного струму. У перших генераторах з самозбудженням обмотку збудження включали, як у Сіменса, послідовно (серієсно) з якірною обмоткою, але в лютому 1867 англійський електротехнік Чарлз Уїтстон (Charles Wheatstone, 1802-1875) запропонував паралельне збудження, що дозволяє краще регулювати ЕРС генератора, до якого він прийшов ще до повідомлень про послідовне збудження, відкрите Сименсом (рис. 3).

Необхідність у **генераторах змінного струму** виникла в 1876 році, коли працюючий в Парижі російський електротехнік Павло Яблочков (1847-1894) став освітлювати міські вулиці за допомогою виготовлених ним дугових ламп змінного струму (свічок Яблочкова). Перші необхідні для цього генератори створив паризький винахідник і промисловець Зеноб Теофіль Грам (Zenobe Theophile Gramme, 1826-1901).

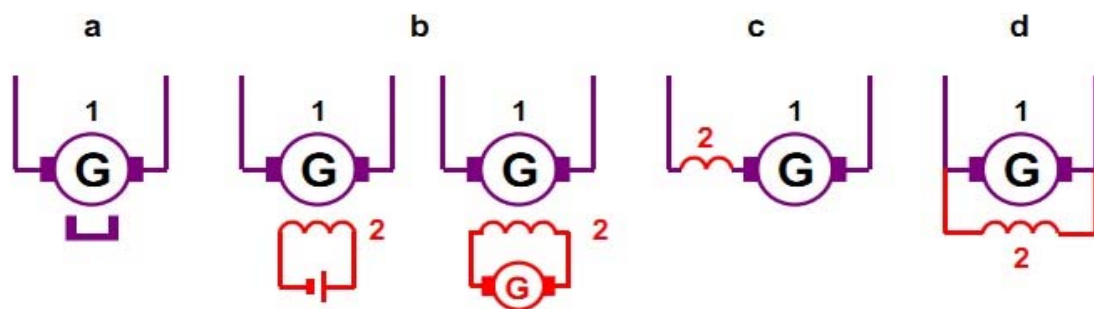


Рисунок 3 – Розвиток систем збудження генераторів постійного струму:

a – збудження за допомогою постійних магнітів (1831), b – зовнішнє збудження (1851), c – послідовне самозбудження (1866), d – паралельне самозбудження (1867) : 1 – якір, 2 – обмотка збудження. Регульовальні реостати струму збудження не показані

З початком масового виробництва ламп розжарювання в 1879 році змінний струм на деякий час втратив своє значення, але знову набув актуальності у зв'язку зі зростанням дальності передачі електроенергії в середині 1880-х років.

У 1888-1890 роках власник науково-дослідної лабораторії Тесла-Електрик (Tesla-Electric Co. , Нью-Йорк, США), який емігрував в США, сербський електротехнік Нікола Тесла (Nikola Tesla , 1856-1943) і головний інженер фірми АЕГ (AEG, Allgemeine Elektrizitäts - Gesellschaft), який емігрував до Німеччини, російський електротехнік Михайло Доливо-Добровольський (1862-1919) розробили трифазну систему змінного струму.

У результаті почалося виробництво все більш потужних **синхронних генераторів** для споруджуваних тепло- і гідроелектростанцій.

Важливим етапом у розвитку турбогенераторів може вважатися розробка в 1898 році циліндричного ротора співвласником швейцарського електротехнічного заводу Браун, Бовері і компанія (Brown, Boveri & Cie., BBC) Чарлзом Еженом Ланселотом Брауном (Charles Eugen Lancelot Brown, 1863-1924).

3 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Ознайомитися з історією винаходів принципів побудови електромашинних перетворювачів механічної енергії в електричну.

2. На основі вивчених принципів побудови електромашинних перетворювачів запропонувати класифікацію принципів дії і скласти класифікаційну схему.

3. За вказівками, які наведено в навчальному фільмі «Найпростіший магнітний генератор» виготовити складові частини генератора, зібрати з цих частин модель генератора та здійснити його випробування.

4. Оформити звіт про виконання лабораторної роботи.

4 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. З якою метою були винайдені електромашинні перетворювачі?
2. На основі яких законів фізики засновано принцип дії електромашинних перетворювачів?
3. Які ознаки можуть бути покладені в основу класифікації електромашинних перетворювачів?

ЗМІСТ ЗВІТУ ЩОДО ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

Звіт по даній лабораторній роботі повинен включати:

1. Найменування роботи і конспект теоретичного розділу (не менше 2-х сторінок).
2. Креслення принципової схеми макета лабораторної роботи.
3. Для кожного етапу виконуваної роботи - найменування етапу і результати (у формі таблиць, графіків, замальовок осцилограм).
4. Короткі висновки з роботи.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

ВИВЧЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРІВ

1 МЕТА РОБОТИ

Ознайомлення з принципом дії та конструктивними особливостями електричних генераторів. Вивчення конструкції генераторів змінної та постійної напруги.

2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Електрична машина - це електромеханічний перетворювач енергії, заснований на явищах електромагнітної індукції і сили Лоренца, що діє на провідник зі струмом, який рухається в магнітному полі.

Можливість створення електричної машини як електромеханічного перетворювача базується на електромагнітній взаємодії, яка здійснюється за допомогою електричного струму і магнітного поля. Електрична машина, в якій електромагнітна взаємодія здійснюється за допомогою магнітного поля називається індуктивною, а в якій за допомогою електричного – ємнісною.

Ємнісні машини практично не використовують, оскільки при кінцевій провідності повітряного середовища (за наявності вологи) заряди будуть стікати з активної зони електричної машини в землю (тобто великі втрати енергії).

Класифікація

Якщо:

- електрична енергія перетворюється в механічну роботу і тепло, то електрична машина є електричним двигуном;
- механічна робота перетворюється в електричну енергію і тепло, тоді електрична машина є електричним генератором;
- коли електрична енергія одного виду перетворюється в електричну енергію іншого виду, тоді електрична машина є електромеханічним перетворювачем;
- коли механічна і електрична енергії перетворюються в тепло, тоді електрична машина є електромагнітним гальмом.

Для більшості машин виконується принцип оборотності, коли одна і та ж машина може виступати як в ролі двигуна, так і в ролі генератора або електромагнітного гальма.

У більшості електричних машин виділяють:

- ротор – обертову частину;
- статор – нерухому частину;
- повітряний проміжок, що їх розділяє.

За принципом дії виділяють нижченаведені види машин:

1. Асинхронна машина – електрична машина змінного струму, в якій частота обертання ротора відрізняється від частоти обертання магнітного поля в повітряному зазорі на частоту ковзання.

2. Синхронна машина – електрична машина змінного струму, в якій частоти обертання ротора і магнітного поля в зазорі рівні.

3. Машина подвійного живлення (і як варіант – асинхронізована синхронна машина) – електрична машина змінного струму, в якій ротор і статор в загальному випадку мають різні частоти живильного струму. В результаті ротор обертається з частотою яка дорівнює сумі (різниці) частот живлячої напруги.

4. Машина постійного струму – електрична машина, що живиться постійним струмом і має колектор.

5. У визначенні (вище по тексту) електрична машина має рухомий провідник з електричним струмом. Трансформатор – електричний апарат змінного струму (електричний перетворювач), що перетворює електричний струм напругою одного номіналу в електричний струм напруги іншого номіналу. Існують статичні і поворотні трансформатори.

6. Інвертор на базі електричної машини (умформер) – як водиться – це пара електричних машин, з'єднаних валами, що виконують перетворення роду струму (постійний в змінний або навпаки), частоти струму, числа фаз, напруг.

7. Вентильний двигун – електрична машина постійного струму, в якій механічний колектор замінений напівпровідниковим комутатором (ПК), збудження здійснюється від постійних магнітів, розміщених на роторі, а статорна обмотка, як в синхронній машині. ПК за сигналами логічного пристрою по черзі, в певній послідовності, попарно підключає фази електродвигуна до джерела постійного струму, створюючи обертове поле статора, яке, взаємодіючи з полем постійного магніту ротора, створює обертовий момент електродвигуна.

Призначення

- Перетворення форм енергії – основне призначення електричних машин в якості двигуна або генератора.
- Перетворення змінного струму в постійний (умформер).
- Перетворення величини напруги.
- Посилення потужності електричних сигналів. У цьому разі електрична машина називається *електромашиинним підсилювачем*.
- Підвищення коефіцієнта потужності електричних установок. У цьому випадку електрична машина називається *синхронним компенсатором*.

Генератор струму

Генератор струму перетворює механічну (кінетичну) енергію в електроенергію. В енергетиці користуються тільки обертовими електромашинними генераторами, заснованими на виникненні електрорушійної сили (ЕРС) в провіднику, на який будь-яким чином діє магнітне поле, що змінюється. Ту частину генератора, яка призначена для *створення магнітного поля*, називають *індуктором*, а частина, в якій *індукується* ЕРС – *якорем*.

Обертову частину машини називають *ротором*, а *нерухому частину* – *статором*.

У синхронних машинах змінного струму індуктором зазвичай є ротор, а в машинах постійного струму – статор. В обох випадках індуктор являє собою зазвичай дво- або багатополюсну електромагнітну систему, забезпечену обмоткою збудження, що живиться постійним струмом (струмом збудження), але зустрічаються і індуктори, що складаються з системи постійних магнітів. В індукційних (асинхронних) генераторах змінного струму індуктор і якорі не можуть чітко (конструктивно) відрізнитися один від одного (можна сказати, що статор і ротор одночасно є і індуктором і якорем).

Більше 95 % електроенергії на електростанціях світу генерується за допомогою синхронних генераторів змінного струму. За допомогою обертового індуктора в цих генераторах створюється обертове магнітне поле, яке наводить в статорній (зазвичай трифазній) обмотці змінну ЕРС, частота якої точно відповідає частоті обертання ротора (знаходиться в синхронізмі з частотою обертання індуктора). Якщо індуктор, наприклад, має два полюси і обертається з частотою 3000 r/min (50 r/s), то в кожній фазі обмотки статора індукується змінна ЕРС частотою 50 Hz. Конструктивне виконання такого генератора спрощено зображено на рисунку 1.

Магнітна система статора являє собою спресований пакет тонких сталевих листів, в пазах якого розташовується статорна обмотка. Обмотка складається з

трьох фаз, зсунутих у разі дво полюсної машини один від одного на $1/3$ периметра статора; в фазних обмотках індуються ЕРС, зміщені одна щодо одної на 120° .

Обмотка кожної фази, у свою чергу, складається з багато виткових котушок, з'єднаних між собою послідовно або паралельно. Один з найбільш простих варіантів конструктивного виконання такої трифазної обмотки дво полюсного генератора спрощено наданий на рисунку 2 (зазвичай число котушок у кожній фазі більше, ніж показано на цьому рисунку). Ті частини котушок, які знаходяться поза пазів, на лобовій поверхні статора, називаються лобовими з'єднаннями.

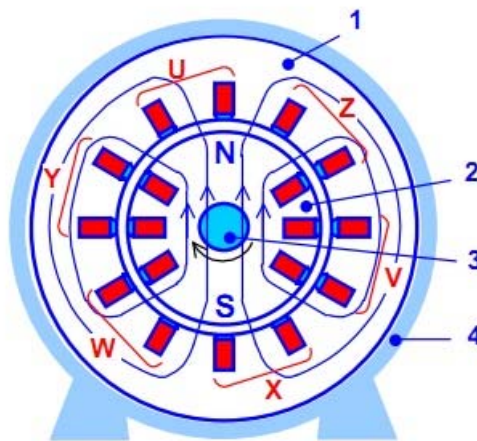


Рисунок 1 – Принцип устрою дво полюсного синхронного генератора:

1 – статор (якір), 2 – ротор (індуктор), 3 – вал, 4 – корпус.

U-X, V-Y, W-Z – розміщення в пазах статора частини обмоток трьох фаз

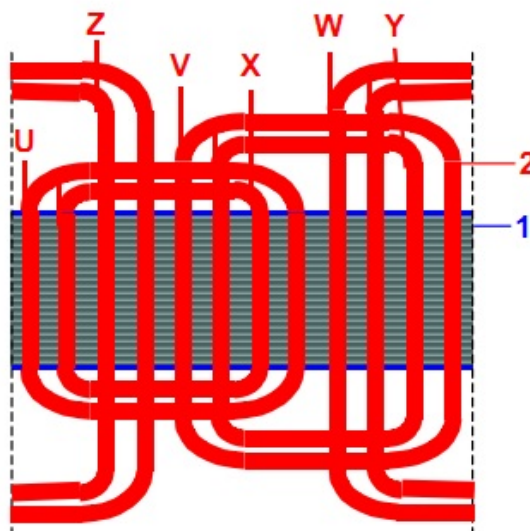


Рисунок 2 – Найпростіший принцип устрою обмотки статора трифазного дво полюсного синхронного генератора у випадку двох котушок у кожній фазі:

1 – розгортка поверхні магнітної системи статора, 2 – котушки обмотки,

U, V, W – початок фазних обмоток, X, Y, Z – кінці фазних обмоток

Полюсів індуктора і відповідно до цього полюсних поділів статора, може бути і більше двох. Чим повільніше обертається ротор, тим більше має бути при заданій частоті струму число полюсів. Якщо, наприклад, ротор обертається з частотою 300 г/мін, то число полюсів генератора для отримання частоти змінного струму 50 Hz має бути 20. Наприклад, на одній з найбільших гідроелектростанцій світу, ГЕС Ітайпу (Itaipu) генератори, що працюють на частоті 50 Hz, виконані 66-полюсними, а генератори, що працюють на частоті 60 Hz - 78-полюсними.

Обмотка збудження дво- або чотириполюсного генератора розміщується, як показано на рисунку 1, в пазах масивного сталевого сердечника ротора. Така конструкція ротора необхідна у випадку швидкохідних генераторів, що працюють при частоті обертання в 3000 або 1500 г/мін (особливо для турбогенераторів, призначених для з'єднання з паровими турбінами), так як при такій швидкості на обмотку ротора діють великі відцентрові сили. При більшому числі полюсів кожен полюс має окрему обмотку збудження (рис. 3).

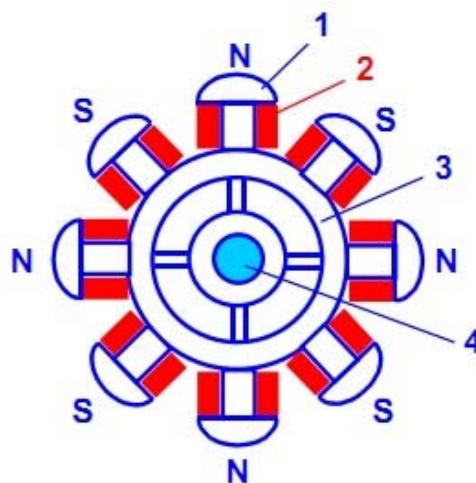


Рисунок 3 – Принцип пристрою ротора тихохідного синхронного генератора:

1 – полюс, 2 – обмотка збудження, 3 – колесо кріплення, 4 – вал

Такий явно полюсний принцип устрою застосовується, зокрема, у разі тихохідних генераторів, призначених для з'єднання з гідротурбінами (гідрогенераторів), що працюють зазвичай при частоті обертання від 60 г/мін до 600 г/мін.

Дуже часто такі генератори відповідно до конструктивного виконання потужних гідротурбін виконуються з вертикальним валом.

Обмотку збудження синхронного генератора зазвичай живлять постійним струмом від зовнішнього джерела через контактні кільця на валу ротора.

Раніше для цього передбачався спеціальний генератор постійного струму (збудник), жорстко пов'язаний з валом генератора, а в цей час використовуються більш прості і дешеві напівпровідникові випрямлячі. Зустрічаються і системи збудження, вбудовані в ротор, в яких ЕРС індукується статорної обмоткою. Якщо для створення магнітного поля замість електромагнітної системи використовувати постійні магніти, то джерело струму порушення відпадає і генератор стає значно простішим і надійнішим, але в той же час і дорожчим. Тому постійні магніти застосовуються зазвичай у відносно малопотужних генераторах (потужністю до декількох сотень кіловат).

Конструкція турбогенераторів, завдяки циліндричному роторові малого діаметру, дуже компактна. Їх питома маса становить зазвичай $0,5 \dots 1 \text{ kg/kW}$, і їх номінальна потужність може досягати 1600 MW. Устрій гідрогенераторів дещо складніший, діаметр ротора великий і питома маса їх тому зазвичай $3,5 \dots 6 \text{ kg/kW}$. До теперішнього часу вони виготовлялися номінальною потужністю до 800 MW.

Асинхронний генератор

Крім синхронних генераторів, відносно рідко і при відносно малих потужностях (до декількох мегават) можуть використовуватися і асинхронні генератори. В обмотці ротора такого генератора струм індукується магнітним полем статора, якщо ротор обертається швидше, ніж статорне обертове магнітне поле мережевої частоти. Необхідність у таких генераторах виникає зазвичай тоді, коли неможливо забезпечити незмінну швидкість обертання первинного двигуна (наприклад, вітряної турбіни, деяких малих гідротурбін і т. п.).

Генератор постійного струму

У генератора постійного струму магнітні полюси разом з обмоткою збудження розташовуються звичайно в статорі, а обмотка якоря – в роторі. Так як в обмотці ротора при його обертанні індукується змінна ЕРС, то якій необхідно забезпечити колектором (комутатором), за допомогою якого на виході генератора (на щітках колектора) отримують постійну ЕРС. На сьогодні генератори постійного струму застосовують рідко, оскільки постійний струм простіше отримувати за допомогою півпровідникових випрямлячів.

Електростатичні генератори

До електромашинних генераторів відносяться і електростатичні генератори, на частинах яких, створюється шляхом тертя (трибоелектризації) електричний заряд високої напруги. Перший такий генератор (сірчана куля що обертається уручну і електризується при терті об руку людини) виготовив в 1663 році мер міста Магдебурга (Magdeburg, Німеччина) Отто фон Гюріке (Otto von Guericke, 1602-1686).

У ході свого розвитку такі генератори забезпечили відкриття багатьох електричних явищ та закономірностей. Вони і зараз не втратили свого значення як засобів проведення експериментальних досліджень з фізики.

3 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Ознайомитися з конструкцією електромашинних перетворювачів механічної енергії в електричну.
2. Скласти класифікаційну схему електромашинних перетворювачів.
3. Переглянути навчальний фільм «Генератор змінного струму».
4. Для наданих зразків електромашинних перетворювачів визначити його тип за складеною класифікаційною схемою.
5. Оформити звіт з лабораторної роботи.

3 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. З яких основних частин складається електромашинний перетворювач?
2. Наведіть основну класифікаційну ознаку синхронних генераторів.
3. Наведіть основну класифікаційну ознаку асинхронних генераторів.
4. Наведіть основну класифікаційну ознаку генераторів постійного струму.

ЗМІСТ ЗВІТУ ПО ЛАБОРАТОРНІЙ РОБОТІ

Звіт щодо лабораторної роботи має включати:

1. Найменування роботи і конспект теоретичного розділу (не менше 2-х сторінок).
2. Креслення принципової схеми макета лабораторної роботи.
3. Для кожного етапу виконуваної роботи – найменування етапу і результати (у формі таблиць, графіків, замальовок осцилограм).
4. Короткі висновки з роботи.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СТАТИЧНИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

1 МЕТА РОБОТИ

Вивчення та експериментальне дослідження схем на півпровідникових діодах.

2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Електронні прилади та пристрої вимагають для свого живлення стабільної напруги постійної величини. Іноді для цієї мети використовують гальванічні батареї або акумулятори, але в більшості практичних випадків таку напругу отримують зі змінної напруги мережі за допомогою блоків живлення, які називають іноді вторинними джерелами живлення. Така назва походить від того, що первинна енергія надходить з електромережі, виробленої електростанцією, яка є первинним джерелом електроенергії.

Мережевий блок живлення містить плавкий запобіжник, трансформатор (частіше понижуючий), випрямляч, згладжує фільтр і стабілізатор напруги. Принципова схема досліджуваного блоку живлення наведена на рисунку 1, на якій також зображений трансформатор з перемикачем напруги.

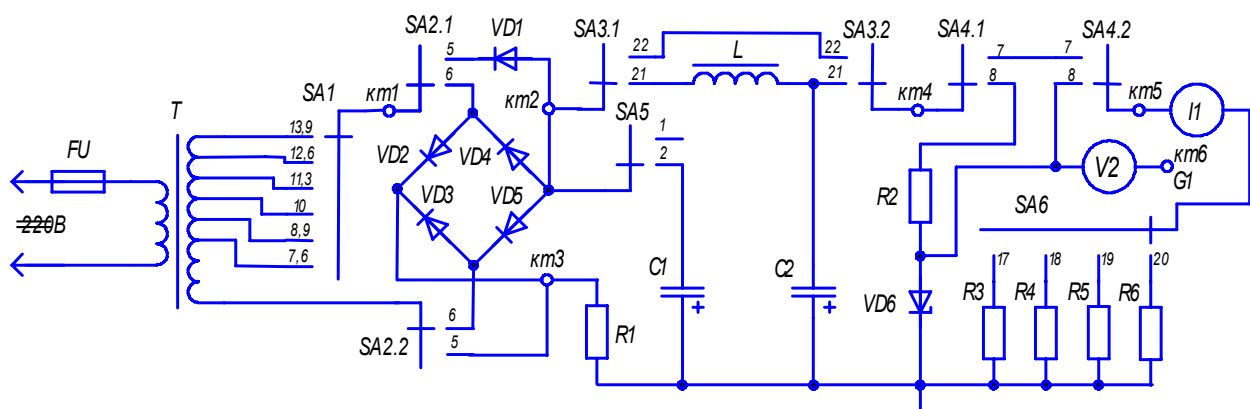


Рисунок 1 – Схема електрична принципова змінного блоку
«Діоди в джерелах живлення» і трансформатора з перемикачем напруги

Блок живлення підключається до електромережі через плавкий запобіжник FU, який розмикає мережеву напругу в тому разі, якщо струм перевищить номінальну величину. Після запобіжника струм надходить в первинну обмотку понижувального трансформатора Т. Вторинна обмотка трансформатора крім

початку і кінця, що містить додаткові відводи, які дозволяють знімати різні величини напруг. Трансформатор необхідний також для гальванічної розв'язки з мережі. Передача енергії від первинної обмотки до вторинної здійснюється за допомогою змінного магнітного поля в осерді трансформатора, тому фазна напруга електромережі не потрапляє в ланцюги, які живить цей блок. Це необхідно з міркувань електробезпеки.

В якості перемикача напруги служить шестипозиційний перемикач SA1. З перемикача можна зняти такі величини змінної напруги: 7,6; 8,9; 10; 11,3; 12,6; 13,9 вольт.

Випрямляч

Випрямлення змінної напруги здійснюється випрямним діодом VD1 або чотирма випрямними діодами VD2-VD5. На виході випрямляча отримуємо пульсуючу напругу одного знака, що змінюється від нуля до максимуму. Один діод VD1 пропускає через себе тільки один півперіод синусоїди, тому називається однопівперіодним випрямлячем. Його недолік в тому, що друга половина періоду "зникає".

Вентильна група з чотирьох півпровідникових діодів VD2 - VD5, з'єднаних в кільце, як показано на схемі, називається випрямним мостом. Такий випрямляч називається двонапівперіодним, так як пропускає через себе два напівперіода синусоїди.

Випрямні діоди пропускають через себе електричний струм тільки, коли р-п перехід зміщується у прямому напрямку, тобто коли до "р" області підключений плюс, а до "n" області мінус. Згідно з вольт-амперною характеристикою діода на прямий гілці відбувається незначне падіння напруги, яка для кремнієвих діодів може доходити до 1 вольт (0,6 вольт точка перегину прямої гілки ВАХ).

У однопівперіодному випрямлячі струм проходить через один діод, тому пікове значення випрямленої напруги зменшується на 0,6-1 вольт. У двопівперіодному випрямлячі струм проходить поперемінно через два діоди, тому в цьому разі пікове значення випрямленої напруги зменшується на 1,2-2 вольт.

Величину пульсацій на виході випрямляча оцінюють коефіцієнтом пульсацій - K_p , який визначається відношенням амплітуди першої гармоніки до середньої величини випрямленої напруги. Для однопівперіодного випрямляча $K_p = 1,57$; а для двопівперіодного випрямляча $K_p = 0,67$, тому двопівперіодний випрямляч має перевагу.

Згладжуючий фільтр

Для згладжування пульсацій вихідної напруги застосовують фільтри. В якості найпростішого фільтра можна використовувати конденсатор С1 великої ємності, включений паралельно випрямлячу. Найпростіший фільтр застосовується, якщо сила струму невелика - частина Ампера. Для великих струмів застосовують фільтри, що складаються з котушок індуктивності L, включених послідовно, і конденсаторів С1, С2 , включених паралельно. Фільтр з однією котушкою індуктивності L, включеної послідовно, і двома конденсаторами С1, С2 , включеними паралельно, називається П - подібним.

Як уже зазначалося, для нормальної роботи електронного пристрою напруга живлення має бути постійною, тому пульсації напруги є дуже шкідливим явищем і з ними треба боротися. Якість фільтра визначають коефіцієнтом згладжування пульсацій КСП.

$$K_{СП} = K_{пвх} / K_{пвих} ,$$

де $K_{пвх}$ – коефіцієнт пульсацій до фільтра,

$K_{пвих}$ – коефіцієнт пульсацій після фільтра.

Чим більше коефіцієнт згладжування пульсацій фільтра, тим менше величина пульсацій після фільтра і тим краще спроектований фільтр.

Особливості двопівперіодного мостового випрямляча полягають в тому, що за період через діоди VD2 - VD5 протікають два імпульси струму. В одному півперіоді струм тече через діоди VD2 і VD5, в іншому – через діоди VD3 і VD4. Частота пульсацій вище в два рази, а величина їх менше. Зворотна напруга на діодах нижче в два рази в порівнянні з однонапівперіодною схемою $U_{обр.макс} > U_{max}$. Ще однією особливістю цієї схеми є відсутність в трансформаторі постійного підмагнічування, тому що струм вторинної обмотки в двох півперіодах протікає в протилежних напрямках.

Стабілізатор напруги

Напруга на виході блоку живлення може змінюватися при зміні напруги в електромережі і при зміні величини споживаного струму. Для зменшення цих змін застосовують стабілізатори напруги. Стабілізатори напруги бувають двох видів: параметричні (їх також називають лінійними) і імпульсні.

Параметричні стабілізатори простіші за своїм устроєм, але мають низький коефіцієнт корисної дії (ККД). Вони працюють за принципом зменшення величини напруги на виході фільтра, яку роблять завідомо більшої величини,

до необхідної величини. При цьому зайва величина напруги втрачається марно, нагріваючи баластний резистор або транзистор. Такий принцип стабілізації напруги можна порівняти з підтриманням постійного рівня води в бочці, якщо на потрібній висоті зробити дренажний отвір. Тоді зайва вода буде марно виливатися назовні, а її рівень буде постійним при різному відтоку з зливного отвору.

У цій роботі досліджується найпростіший параметричний стабілізатор напруги, виконаний на стабілітроні VD6 і резистори R2. Якість стабілізатора може бути оцінена коефіцієнтом стабілізації:

$$K_{\text{СТ}} = (\Delta U_{\text{ВХ}} / (U_{\text{ВХ НОМ}})) / (\Delta U_{\text{ВИХ}} / U_{\text{ВИХ НОМ}}),$$

де $\Delta U_{\text{ВХ}}$ – зміна вхідної напруги;

$U_{\text{ВХ НОМ}}$ – номінальна величина напруги у вторинній обмотці трансформатора (максимальна величина напруги в даній роботі);

$\Delta U_{\text{ВИХ}}$ – зміна вихідної напруги після стабілізатора;

$U_{\text{ВИХ НОМ}}$ – номінальна величина напруги після стабілізатора, відповідна максимальної величини напруги у вторинній обмотці трансформатора.

Оцінка коефіцієнта стабілізації має бути проводитися при максимальному струмі навантаження.

Завдання

Дослід 1. Виміряти напруги вторинної обмотки трансформатора за допомогою осцилографа.

Активізувати контрольну точку КТ1 першої клавішею комутатора.

Перемикач SA1 поставити в положення 13,9.

Перемикачі SA2 - SA6 поставити в такі положення: 1, 5, 7, 17, 22.

Налаштувати осцилограф, включивши відкритий вхід. На осцилографі C1-72 натиснути кнопку з позначенням:



На осцилографі C1-68 поставити тумблер в положення « $\overline{\sim}$ ».

Підключити вимірювальний кабель осцилографа до стенду, з'єднавши штекер «земля» з будь-яким заземленим гніздом стенда. Тимчасово встановити сигнальний штекер осцилографа в сусіднє заземлене гніздо стенда і в цьому положенні встановити нульову лінію на верхній межі екрану, а потім встановити сигнальний штекер осцилографа на місце, підключивши до верхнього гнізда «КТ». Перемикач «Підсилювач Y» поставити в таке положення, щоб корисний сигнал займав максимальну площу екрану.

Ручками «стабільність» і «рівень» домогтися нерухомої картинки. Ручкою «час / ділення» виділити на екрані 2-4 півхвилі.

Вимірювання амплітуди сигналу в цьому разі проводиться шляхом відліку поділок на екрані від його верхньої межі. (Ділити на 2 в цьому випадку не треба!)

Нагадаємо, що категорично забороняється приєднувати заземлений - ний штекер осцилографа до незаземлених точок схеми.

Змінюючи положення перемикача SA1 від 7,6 до 13,9 виміряти амплітудні значення напруги і розрахувати їх середньоквадратичні величини. Заповнити таблицю 1, використовуючи формулу:

$$U_{\text{скв}} = 0,707 U_a.$$

Відзначити наскільки виміряні значення середньоквадратичних величин відрізняються від зазначених на перемикачі. Пояснити, з чим пов'язані ці відхилення.

Таблиця 1.

Номінальна напруга, яка вказана на перемикачі	7.6	8.9	10	11,3	12,6	13,9
Амплітудне значення напруги U_a						
Середньоквадратичне значення напруги $U_{\text{скв}}$						
Відхилення виміряних величин напруги від номінальних						

Дослід 2. Виміряти пікові значення напруги після випрямляча за допомогою осцилографа для однопівперіодного випрямляча для чого поставити перемикач SA2 в положення – 5 і для двопівперіодного випрямляча, поставивши перемикач в положення – 6.

Активізувати контрольну точку КТ2 другою клавішею комутатора.

Перемикачі SA3 – SA6 поставити в такі положення: 1 , 7,17 , 22 .

Змінюючи положення перемикача SA1 від 7,6 до 13,9 і не змінюючи налаштування осцилографа виміряти пікові значення напруги випрямляча $U_{\text{max 1}}$ і $U_{\text{max 2}}$. Розрахувати падіння напруги на діодах, порівнюючи отримані пікові напруги з амплітудними U_a з таблиці 1.

Заповнити таблицю 2, використовуючи формули:

$$U_{\text{діода}} = U_a - U_{\text{max } 1},$$

$$U_{\text{моста}} = U_a - U_{\text{max } 2},$$

де U_a – амплітудна напруга вторинної обмотки трансформатора;

$U_{\text{max } 1}$ – пікове значення після однонапівперіодного випрямляча;

$U_{\text{max } 2}$ – пікове значення після двопівперіодного випрямляча.

Примітка: Вимірювання здійснювати за тією ж методикою, що і в першому досліді, не змінюючи налаштування осцилографа.

Таблиця 2

Номінальна напруга, яка вказана на перемикачі	7.6	8.9	10	11,3	12,6	13,9
Однонапівперіодний випрямляч, пікова напруга $U_{\text{max } 1}$						
Падіння напруга на діоді $U_{\text{діода}}$						
Двонапівперіодний випрямляч, пікова напруга $U_{\text{max } 2}$						
Падіння напруга на діодах ви- прямого моста $U_{\text{моста}}$						

Контрольні питання

1. Як працюють однопівперіодний і двопівперіодний мостовий випрямляч?
2. Які основні параметри випрямлячів?
3. На чому заснована робота LC - фільтра і що таке коефіцієнт згладжування?
4. У чому відмінність роботи діода в однопівперіодній і двопівперіодній схемах?

Зміст звіту щодо лабораторної роботи

Звіт щодо лабораторної роботи повинен включати:

1. Найменування роботи і конспект теоретичного розділу (не менше 2-х сторінок).
2. Креслення принципової схеми макета лабораторної роботи.
3. Для кожного етапу виконуваної роботи – найменування етапу і результати (у формі таблиць, графіків, замальовок осцилограм).
4. Короткі висновки з роботи.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

1 МЕТА РОБОТИ

1. Вивчити роботу фотоперетворювача
2. Визначити залежність фотоЕДС від освітленості для режимів з підключеним навантаженням і розімкнутого ланцюга.

2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Основні поняття

Фотоперетворювачем (фотодатчиком, фотоелементом) називається електронний прилад, який перетворює енергію фотонів в електричну енергію. Фотодатчики можуть реєструвати і перетворювати як видиме випромінювання, так і невидиме (інфрачервоне, ультрафіолетове).

Світло – електромагнітне випромінювання, що випускається нагрітою або такою що перебуває в збудженому стані речовиною в діапазоні частот, що сприймаються людським оком (380-780 нм, від фіолетового до червоного).

Світло може розглядатися і як електромагнітна хвиля, і як потік фотонів: частинок, що володіють певною енергією і нульовою масою спокою.

Однією з характеристик світла є його колір, який визначається довжиною хвилі. Фізичні величини, пов'язані зі світлом:

- яскравість;
- освітленість;
- світловий потік; світлова віддача.

Поняття випромінювання пов'язано, насамперед, з перенесенням в просторі якоїсь кількості енергії – енергії випромінювання. Для оцінки цієї енергії був введений аналог поняття потужності – потік енергії.

Потік енергії – це величина, що дорівнює відношенню енергії, яку переносять випромінюванням, до інтервалу часу, за який ця енергія переноситься. Якщо позначити цей час як dt , а енергію, що переноситься випромінюванням, як dQ_e , то потік енергії Φ_e можна визначити як:

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}.$$

Світло являє собою за звичай складне випромінювання, тобто сукупність (спектр) простих (монохроматичних) випромінювань з певною довжиною хвилі. Для оцінки внеску кожного монохроматичного випромінювання в загальний спектр, вводять ще одне поняття – **спектральна щільність потоку випромінювання** (спектральна потужність випромінювання) Φ_λ . Ця величина є функція довжини хвилі і визначається як відношення потоку енергії в нескінченно малому діапазоні близько деякого значення довжини хвилі до цього діапазону.

Відомо, що людське око сприймає різне випромінювання по-різному. В залежності від довжини хвилі, випромінювання однакової потужності викликає різну реакцію. Наприклад, випромінювання з довжиною хвилі 300 нм ми взагалі не побачимо, а випромінювання тієї ж потужності, але з довжиною хвилі 555 нм буде видно краще, ніж будь-яке інше. Щоб врахувати всі ці особливості Міжнародною комісією з освітлення (МКО) була введена функція $V(\lambda)$ – відносна спектральна світлова ефективність випромінювання для стандартного фотометричного спостерігача МКО (для денного зору).

Функція ця не дорівнює нулю у всьому діапазоні видимого світла, а максимум функції $V(\lambda)$ припадає на довжину хвилі 555 нм, якій відповідає найбільш сильна реакція середньостатистичного ока.

Для обчислення величини світлового потоку необхідно проінтегрувати у видимому діапазоні частот спектральну щільність потоку випромінювання Φ_λ :

$$\Phi = K_m \int_{380\text{ нм}}^{780\text{ нм}} \Phi_\lambda \cdot V(\lambda) d\lambda,$$

де K_m – фотометричний еквівалент випромінювання ($K_m=683$ лм/Вт).

Для оцінки випромінювання стосовно його дії на око людини ввели нову систему – систему світових величин, основною одиницею якої став люмен.

Люмен (лм, lm) – одиниця виміру світлового потоку в системі СІ . Випромінювання з довжиною хвилі 555 нм і потоком (потужністю) 1 Вт еквівалентно 683 люменам світлового потоку.

Один люмен дорівнює світловому потоку, що випускається точковим ізотропним джерелом, з силою світла, яка дорівнює одній канделі, в тілесний кут, величиною в один стерadian (1 лм = 1 кд • ср) . Повний світловий потік, створюваний ізотропним джерелом, з силою світла одна кандела дорівнює 4π люменам.

Важливим поняттям є **сила світла**. Сила світла в заданому напрямку - це відношення світлового потоку, що поширюється рівномірно в нескінченно малому тілесному куті, до величини цього кута. Іншими словами – це просторова щільність світлового потоку.

Сила світла з різних напрямків – це дуже важлива характеристика будь-якого світильника і світлового приладу: вона показує, яким чином прилад "світить" в простір навколо себе. Одиниця сили світла – це кандела (позначення: кд, cd). Вона є однією з основних одиниць системи СІ і чисельно дорівнює силі світла світлового потоку, що випускається в заданому напрямку джерелом монохроматичного випромінювання частотою $540 \cdot 10^{12}$ Гц потужністю $1/683$ [Вт / стерadian].

Сила світла деяких типових джерел:

- свічка – 1 кд;
- сучасна лампа розжарювання (100 Вт) – 100 кд;
- світлодіод – 0,001 кд.

Світність – щільність світлового потоку щодо поверхні випромінювача, тобто відношення потоку, випромінюваного нескінченно малою ділянкою випромінювача, до площі цієї ділянки.

Освітленість – щільність світлового потоку щодо освітлюваної поверхні. Освітленість вимірюється в люксах (лк). Один люкс – це освітленість, яка має поверхню площею 1 м^2 з падаючим на неї світловим потоком в 1 люмен.

Освітленість прямо пропорційна силі світла джерела світла. При видаленні його від освітлюваної поверхні її освітленість зменшується обернено пропорційно квадрату відстані.

Коли промені світла падають похило до освітлюваної поверхні, то освітленість збільшується пропорційно косинусу кута падіння променів.

Освітленість E знаходять за формулою:

$$E = \frac{I}{r^2} \cos(i),$$

де I – сила світла в канделах;

r – відстань до джерела світла;

i – кут падіння променів світла.

Освітленість визначають за допомогою фотоелектричного **експонометра**.

Напівпровідники

Напівпровідниками прийнято вважати широкий клас речовин, чия електропровідність менше ніж у металів ($10^6 - 10^4 \text{ Ом}^{-1}$), але більше ніж у хороших діелектриків ($10^{-10} - 10^{-12} \text{ Ом}^{-1}$). Відмінність між напівпровідниками і діелектриками є швидше кількісною, ніж якісною, діелектрики теж можуть досягати при високих температурах величин електропровідності, характерних для напівпровідників.

У реальній практиці термін «напівпровідники» зазвичай застосовують до речовин, у яких напівпровідні властивості чітко виражені вже при кімнатних температурах (30K) . Приклади таких речовин :

1. Елементи IV групи таблиці Менделєєва **кремній і германій** – до теперішнього часу найбільш повно вивчені і широко застосовуються в електроніці. Атоми цих елементів мають по 4 валентних електрони і утворюють решітки типу алмазу з ковалентним зв'язком атомів. Сам алмаз теж має напівпровідникові властивості, однак при кімнатній температурі його електропровідність дуже мала.

2. Алмазоподібні напівпровідники. До них відносяться з'єднання елементів III групи періодичної системи з елементами V групи: GaAs , InSb , GaP , InP. Такі напівпровідники називаються напівпровідниками типу $A^{III} B^V$.

3. Елементи VI і V груп та їх аналоги. Елементи VI групи Te і Se як напівпровідники були відомі раніше, ніж Ge і Si, причому Se широко використовувалася у випрямлячах електричного струму і фотоелементах. Елементи V групи As, Sb і Bi – напівметали, за властивостями близькі до напівпровідників, а їх найближчі аналоги – сполуки типу $A^{IV} B^{VI}$ (PbS, PbTe, SnTe, GeTe тощо), які мають у середньому по 5 валентних електронів на атом, утворюють одну з найбільш важливих груп напівпровідників, відому в першу чергу застосуванням як приймачів інфрачервоного випромінювання.

4. З'єднання елементів VI групи з перехідними або рідкоземельними металами (Ti, V, Mn, Fe, Ni, Sm, Eu і т.п.). У цих напівпровідниках переважає іонний зв'язок. Більшість з них володіє тією або іншою формою магнітного впорядкування (ферромагнетики або антиферромагнетики). Поєднання напівпровідникових і магнітних властивостей і їх взаємний вплив цікаво як з теоретичної точки погляду, так і для багатьох практичних застосувань.

5. Органічні напівпровідники. Багато органічних сполук також володіють напівпровідниковими властивостями. Їх електропровідність, як правило, мала (10^{-10} Ом^{-1}) і сильно зростає під дією світла. Однак деякі органічні напівпровідники (кристали і полімери на основі сполук тетраціанхінодіметана TCNQ, комплекси на основі фталоціанина, перилена, віолантрена та ін.) мають при кімнатній температурі електропровідність, порівняну з провідністю хороших неорганічних П.

Електрони і дірки в напівпровідниках

Так як в твердому тілі атоми або іони зближені на відстань, порівняну з розмірами самого атома, то в ньому відбуваються переходи валентних електронів

від одного атома до іншого. Такий електронний обмін може привести до утворення ковалентного зв'язку. Це відбувається у разі, коли електронні оболонки сусідніх атомів сильно перекриваються і переходи електронів між атомами відбуваються досить часто.

Ця картина повністю застосовна до такого типового напівпровідника, як германій (Ge). Всі атоми германію нейтральні і зв'язані один з одним ковалентним зв'язком. Однак електронний обмін між атомами не приводить безпосередньо до електропровідності, оскільки в цілому розподіл електронної щільності жорстко фіксовано: по два електрони на зв'язок між кожною парою атомів – найближчих сусідів. Щоб створити провідність в такому кристалі, необхідно розірвати хоча б один із зв'язків (нагрівання, поглинання фотона і т.д.), тобто, видаливши з неї електрон, перенести його в яку-небудь іншу клітинку кристала, де всі зв'язки заповнені і цей електрон буде зайвим.

Такий електрон надалі вільно може переходити з комірки в комірку, оскільки всі вони для нього еквівалентні, і будучи всюди зайвим, він переносить з собою надмірний негативний заряд, тобто стає електроном провідності.

Розірваний же зв'язок стає блукаючим щодо кристалу діркою, оскільки в умовах сильного обміну електрон одного з сусідніх зв'язків швидко займає вільне місце, залишаючи розірваним той зв'язок, звідки він пішов. Недолік електрона в одному зі зв'язків означає наявність у атома (або пари атомів) одиничного позитивного заряду, який, таким чином, переноситься разом з діркою.

У разі іонного зв'язку перекриття електронних оболонок менше, електронні переходи менш часті. При розриві зв'язку також утворюються електрон провідності і дірка – зайвий електрон в одній з комірок кристалу і некомпенсований позитивний заряд в іншій комірці. Обидва вони можуть переміщатися по кристалу, переходячи з однієї комірки в іншу.

Наявність двох різнойменно заряджених типів носіїв струму – електронів і дірок є загальною властивістю напівпровідників і діелектриків. В ідеальних кристалах ці носії з'являються завжди парами – збудження одного з пов'язаних електронів і перетворення його в електрон провідності неминуче викликає появу дірки, так що концентрації обох типів носіїв рівні.

Це не означає, що внесок їх у електропровідність однаковий, оскільки швидкість переходу з комірки в комірку (рухливість) у електронів і дірок може бути різною. У реальних кристалах, що містять домішки і дефекти структури, рівність концентрацій електронів і дірок може порушуватися, так що електропровідність в такому разі буде здійснюватися практично тільки одним типом носіїв.

Домішки в напівпровідниках р і n - типи напівпровідників

Електропровідність напівпровідника може бути обумовлена, як електронами власних атомів даної речовини (власна провідність), так і електронами домішкових атомів (домішкова провідність). Поряд з домішками джерелами носіїв струму можуть бути і різні дефекти структури, наприклад вакансії, міжвузольні атоми, а також нестача або надлишок атомів одного з компонентів у напівпровідникових з'єднаннях (відхилення від стехіометричного складу), наприклад, недолік Ni в NiO або S в PbS.

Домішки діляться на донорні і акцепторні. Донори віддають в об'єм напівпровідника надлишкові електрони і створюють таким чином електронну провідність (n-типу). Акцептори захоплюють валентні електрони речовини, в яку вони впроваджені, в результаті чого створюються дірки і виникає діркова провідність (p-типу).

Типові приклади донорів – домішкові атоми елементів V групи (P, As, Sb) в Ge і Si. Включаючись в кристалічну ґратницю, такий атом заміщає в одній з комірок атом Ge. При цьому 4 з 5 його валентних електронів утворюють з сусідніми атомами Ge ковалентні зв'язки, а 5-й електрон виявляється для даної ґратниці зайвим, так як всі зв'язки вже насичені.

Аналогічно атоми елементів III групи (B, Al, Ga, In) – типові акцептори в Ge і Si. Захоплюючи один з валентних електронів Ge на додаток до своїх трьох валентних електронів, вони утворюють чотири ковалентні зв'язки з найближчими сусідами – атомами Ge – і перетворюються в негативно заряджені іони. У місці захопленого електрона залишається дірка, яка так само, як і електрон поблизу донорного іону, може бути утримана в околиці акцепторного іона кулонівським тяжінням до нього, проте на великій відстані і з дуже малою енергією зв'язку. Тому при не дуже низьких температурах ці дірки вільні.

Фотопровідність напівпровідників

Фотопровідність напівпровідників – це збільшення електропровідності під дією світла, як правило, обумовлена появою додаткових нерівноважних носіїв в результаті поглинання електронами квантів світла з енергією, що перевищує енергію їх зв'язку. Розрізняють власну і домішкову фотопровідності. У першому випадку фотон поглинається валентним електроном, що призводить до народження парів електрона – дірка. Пари електрона – дірка можуть створюватися і фотонами з енергією, дещо меншою E_g , тому можливі процеси, в яких елек-

трон, поглинаючи фотон, отримує додаткову енергію за рахунок теплового руху (кристалічної гратниці або від рівноважного носія струму). Під дією істотно більш довгохвильового світла фотопровідність виникає тільки при наявності домішок, що створюють локальні рівні в забороненій зоні, і пов'язана з переходом електрона або з локального рівня в зону провідності, або з валентної зони на локальний рівень домішки (народження дірки).

Явище фотопровідності дозволяє за короткий час (порядку мікро- і наносекунд) змінювати електропровідність напівпровідника в дуже широких межах, а також дає можливість створювати високі концентрації носіїв струму, в яких через відносно великий E_g і відсутність відповідних домішок не вдається отримати помітних рівноважних концентрацій носіїв.

Використання фотопровідності напівпровідників з різними E_g і глибиною домішкових рівнів (Si, Te, InSb, PbS, CdS, PbTe, Ge, легований Zn або Au і т.д.) дозволяє створювати високочутливі приймачі світла для різних областей спектра від далекої інфрачервоної до видимої.

Струми в напівпровідниках

Рух носіїв заряду в напівпровіднику зумовлено двома механізмами – дрейфовим і дифузійним. Електричне поле, в яке поміщений півпровідник викликає спрямований рух носіїв – дрейф. Причиною ж дифузії носіїв заряду є наявність градієнта концентрації вільних носіїв.

Якщо в напівпровіднику є області підвищеної і зниженої концентрацій, то в ньому виникає «перетікання» носіїв, тому число часток, що йдуть з будь-якої області в результаті хаотичного руху, пропорційно числу частинок, що знаходяться в ній, а число яких приходять – пропорційно числу частинок в сусідніх з нею областях. Дифузійні потоки, вирівнюючи концентрації, пропорційні інтенсивності теплового руху і перепаду концентрації і спрямовані в бік її зменшення.

З урахуванням сказаного щільність струму в напівпровідниках в загальному випадку буде сумою чотирьох компонент :

$$j = j_{pE} + j_{pD} + j_{nE} + j_{nD}.$$

Контактні явища та p і n – перехід

Контакти з металом або з іншим напівпровідником володіють іноді випрямлюючими властивостями, тобто значно ефективніше пропускають струм в одному напрямку, ніж у зворотному. Це відбувається тому, що в приконтактній

області змінюється концентрація або навіть тип носіїв заряду, тобто утворюється просторовий заряд, що забезпечує контактну різницю потенціалів, необхідну для вирівнювання (у стані рівноваги) рівнів Фермі по обидві сторони контакту.

На відміну від металів, в напівпровідниках ця область виявляється досить широкою, щоб при малій концентрації носіїв забезпечити потрібний перепад потенціалу. Якщо знак контактної різниці потенціалів такий, що концентрація носіїв в приконтактній області стає меншою, ніж в об'ємі напівпровідника, то приконтактний шар визначає електроопір всієї системи. Зовнішня різниця потенціалів додатково зменшує число носіїв у приконтактній області, якщо вона додається до контактної різниці потенціалів або, навпаки, збільшує їх концентрацію, якщо знак її протилежний. Таким чином, опір контакту для струмів в прямому і зворотному напрямках виявляється істотно різним, що і забезпечує випрямляючі властивості контакту (бар'єр Шотки).

Такі контакти були першими напівпровідниковими приладами (випрямлячі, детектори), проте розвиток напівпровідникової електроніки почалося лише після того, як були створені р-п – переходи – контакти областей напівпровідника з різним типом провідності всередині єдиного напівпровідникового кристала. Контактна різниця потенціалів в цьому випадку близька до ширини забороненої зони, тому F в п – області лежить поблизу дна зони провідності E_c , а в р-області – поблизу валентної зони E_v . Зовнішня різниця потенціалів, що зменшує її викликає дифузійні потоки електронів в р-область і дірок в п-область (інжекцію неосновних носіїв струму). У зворотному напрямку р-п – перехід практично не пропускає струм, тому обидва типи носіїв відтягуються від області переходу.

У напівпровідниках з великою довжиною дифузії, таких, як Ge і Si, інжектовані одним р-п – переходом нерівноважні носії можуть досягати іншого, близько розташованого р-п – переходу, і суттєво визначати струм через нього. Струм через р-п – перехід можна змінювати, створюючи поблизу нього нерівноважні носії яким-небудь іншим способом, наприклад освітленням.

Перша з цих можливостей управління струмом р-п – переходу (інжекція) є фізичною основою дії транзистора, а друга (фотоерс) – сонячних батарей.

На рисунку 1 наведено зонні діаграми, що ілюструють етапи формування електронно-діркового переходу.

Границя, де рівень Фермі перетинає середину забороненої зони, називають фізичним р-п переходом.

Вольт-амперна характеристика р-n – переходу (діода) з доданою зовнішньою напругою V_g буде мати наступний вигляд:

$$J = J_s (e^{\beta V_g} - 1), \quad (1)$$

де J_s – щільність струму насичення, рівна:

$$J_s = \frac{qL_n n_{p0}}{\tau_n} + \frac{qL_p p_{n0}}{\tau_p}$$

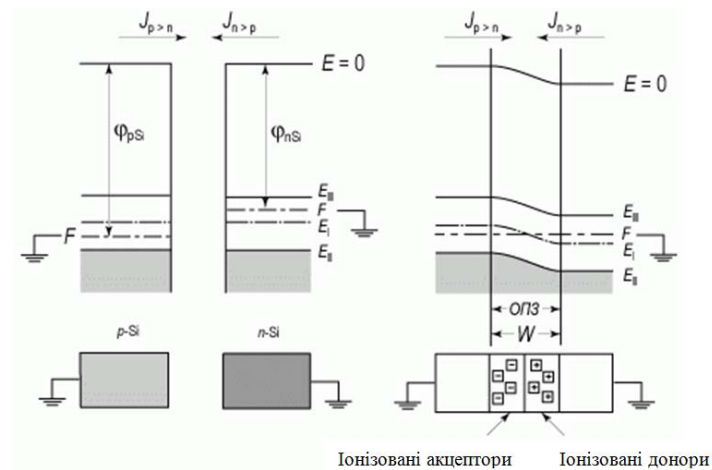


Рисунок 1– Схема формування р-n – переходу

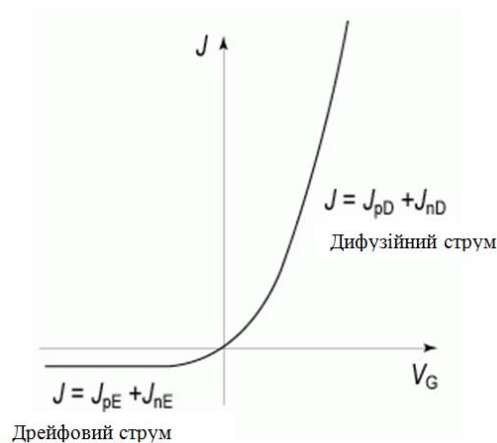


Рисунок 2 – Вольтамперна характеристика р-n – переходу

Як впливає з наведеного вище співвідношення (1) і рисунка 2, вольт-амперна характеристика ідеального р-n переходу має яскраво виражений несиметричний вигляд. В області прямих напруг струм р-n переходу дифузний і експоненціально зростає із зростанням прикладеної напруги. В області негативних напруг струм р-n переходу - дрейфовий і не залежить від прикладеної напруги.

Типи фотодатчиків

Всі фотодатчики за принципом дії можна розділити на дві великі групи: теплові та фотонні.

У свою чергу **фотонні приймачі** підрозділяють на фотодетектори, засновані на:

- зовнішньому фотоефекті (фотоелектронні помножувачі і вакуумні фотоелементи, електронно-оптичні перетворювачі);
- внутрішньому фотоефекті (фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори, фототиристри і т. п.).

Принцип дії **теплових фотоприймачів** заснований на реєстрації зміни властивостей матеріалу при зміні його температури внаслідок поглинання оптичного випромінювання.

Інерційність теплових приймачів велика (> 10 мс), а чутливість порівняно низька. Тому в системах передачі інформації вони не використовуються. Теплові приймачі застосовуються там, де необхідно забезпечити сталість спектральної чутливості, а також у далекій ІЧ-області спектра.

ФотоЕРС на р-п переході

Вольт-амперна характеристика для активного режиму роботи (прикладена зовнішня напруга) має вигляд:

$$J = J_{\phi} + J_s (e^{\beta V_g} - 1). \quad (2)$$

За відсутності зовнішнього джерела $V_g = 0$, напругу фотоелемента докладено до навантажувального опору і обумовлено фотострумом при висвітленні фотоелемента. Розглянемо два окремих випадка рівняння (2).

Розімкнутий ланцюг

При розімкненому зовнішньому ланцюзі ($R = \infty$) струм через зовнішній ланцюг не протікає. У цьому разі напруга на виходах фотоелемента буде максимальною і рівною ЕРС фотоелемента. Цю величину називають напругою холостого ходу V_{xx} . З рівняння (2), за умови $J = 0$, отримуємо рівняння, що дозволяє за відомим значенням фотоструму J_{ϕ} і струму навантаження J_s розрахувати напругу холостого ходу V_{xx} :

$$V_{xx} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{\phi}}{I_s} + 1 \right) = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{n_0}{n_{\phi}} + 1 \right) \quad (3)$$

Напругу V_{xx} (фото ЕРС) можна також визначити безпосередньо, підключаючи до виходів фотоелемента вольтметр у відсутність навантаження. Внутрішній опір вольтметра має бути багато більше опору р-п переходу.

Режим з підключеним навантаженням

У режимі короткого замикання напруга на виходах фотоелемента $V_G = 0$. Тоді з рівняння (1) випливає, що струм короткого замикання $J_{кз}$ у зовнішньому ланцюгу дорівнює фотострумові J_Φ :

$$J_{кз} = J_\Phi. \quad (4)$$

Отже, в режимі короткого замикання визначається величина фотоструму J_Φ .

Світлова залежність

Світлова характеристика являє собою залежність величини фотоструму J_Φ від світлового потоку Φ , що падає на фотоелемент. Сюди ж відноситься і залежність V_{xx} від величини світлового потоку. Кількість електронно-діркових пар, що утворюються в фотоелементі при опроміненні пропорційна кількості фотонів, що падають на фотоелемент. Тому фотострум буде пропорційний величині світлового потоку:

$$J_\Phi = K \cdot \Phi, \quad (5)$$

де K – коефіцієнт пропорційності, що залежить від параметрів фотоелемента. У фотодіодному режимі струм у зовнішньому ланцюзі пропорційний світловому потоку і не залежить від напруги V_G .

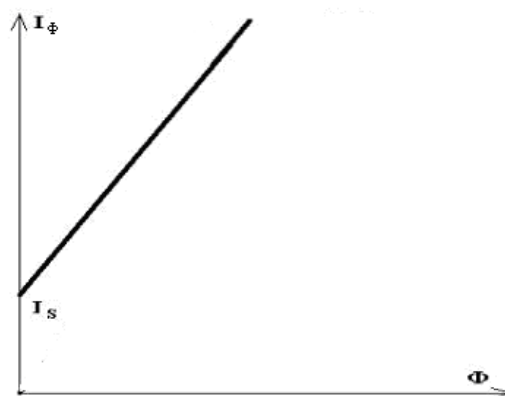


Рисунок 3 – Світлова характеристика фотоелемента

Коефіцієнт пропорційності K в рівнянні (5) отримав назву інтегральної чутливості фотоелемента.

Люксметр

Призначений для вимірювання освітленості, створюваної лампами розжарювання і природним світлом, джерела якого розташовані довільно відносно світлоприймача люксметра.

Переносний фотоелектричний люксметр загальнопромислового призначення застосовується для контролю освітленості в промисловості, в сільському господарстві, на транспорті та інших галузях народного господарства, а також для досліджень, що проводяться в наукових, конструкторських і проектних організаціях.



Технічні дані приладу:

- діапазон вимірювань люксметра від 0,1 до 100000 Lx;
- клас точності 10;
- шкали приладу нерівномірні, градуйовані в люксах: одна шкала має 100 поділок, друга – 30 поділок;
- межі допустимої похибки в основному діапазоні вимірювань 5-30 і 20-100 Lx (без насадок) не повинні перевищувати 10 % від значення вимірюваної освітленості.

3. ПОРЯДОК РОБОТИ

1. Включити джерело живлення ТЕС23 і вольтметр.
2. Ручкою Фіно на джерелі живлення встановити максимальне відхилення стрілки люксметра.
3. Виміряти освітленість в діапазоні $100 \div 0$ з кроком 10 поділок.
4. Для кожної точки освітленості виміряти фото ЕДС при відключеному і включеному люксметрі.
5. Вивести ручку Фіно на 0. Вимкнути прилади.

6. Побудувати графіки $U_{\phi} = f(L_x)$.

7. Враховуючи, що $I_{\phi} \sim U_{\phi}$, а освітленість пропорційна світловому потоку, із залежності $U_{\phi} = f(L_x)$ для випадку замкнутого ланцюга розрахувати чутливість фотодатчика в одиницях [Вольт/Люкс].

4 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Навести перелік основних величин, що характеризують світловий потік.
2. Навести визначення напівпровідників.
3. Назвати основні класи напівпровідників.
4. Навести основні характеристики напівпровідників.
5. Навести основні способи застосування напівпровідників.

Зміст звіту щодо лабораторної роботи

Звіт щодо лабораторної роботи має включати:

1. Найменування роботи і конспект теоретичного розділу (не менше 2-ох сторінок).
2. Креслення принципової схеми макета лабораторної роботи.
3. Для кожного етапу виконуваної роботи – найменування етапу і результати (у формі таблиць, графіків, замальовок осцилограм).
4. Короткі висновки з роботи.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЛЬВАНІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

1. МЕТА РОБОТИ

Дослідити можливість перетворення хімічної енергії в електричну при роботі гальванічного елемента. Дослідити вплив різних чинників на величину ЕРС елементів.

2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Основні поняття

Для виконання даної роботи необхідне знання наступних питань:

1. Електродний потенціал металу. Механізм його виникнення.
2. Фактори, що впливають на величину електродного потенціалу. Рівняння Нернста.
3. Ряд напруг металів. Відновлювальна здатність атомів металів і окислювальна здатність їх іонів.
4. Принцип роботи гальванічних елементів. Процеси, що протікають на електродах. Визначення ЕРС елемента.

При зануренні металу в розчин електроліту на межі розділу фаз утворюється подвійний електричний шар. Позитивно заряджений шар створюється остовами атомів, що знаходяться у вузлах кристалічної решітки і утворюють поверхню розділу. Негативно заряджений шар утворюється електронами провідності, розташованими в поміж вузлами кристалічної решітки. На межі розділу фаз (метал – електроліт) виникає стрибок потенціалу, що називається **електродним потенціалом металу**. Безпосередньо його заміряти неможливо, тому його замірюють щодо будь-якого електрода, який називається **електродом порівняння**. Найчастіше електродом порівняння служить нормальний водневий електрод.

Електродний потенціал металу, зануреного в розчин своєї солі з концентрацією 1 моль/л, виміряний відносно нормального водневого електрода, при температурі 25 °С, називається нормальним, або стандартним електродним потенціалом металу E_0 .

Виміряні таким чином електродні потенціали металів розташовують у порядку зростання їх величин в так званий ряд напруг металів, або ряд стандартних електродних потенціалів. Ряд напруг і числові значення електродних потенціалів наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Ряд напруг і числові значення електродних потенціалів

Електрод	E_0 , В	Електрод	E_0 , В	Електрод	E_0 , В
Li^+ / Li	– 3.02	$\text{Mn}^{2+} / \text{Mn}$	– 1.180	$2\text{H}^+ / \text{H}_2$	0.000
Rb^+ / Rb	– 2.99	$\text{Zn}^{2+} / \text{Zn}$	– 0.763	$\text{Sb}^{3+} / \text{Sb}$	0.20
K^+ / K	– 2.925	$\text{Cr}^{3+} / \text{Cr}$	– 0.740	$\text{Bi}^{3+} / \text{Bi}$	0.23
$\text{Ba}^{2+} / \text{Ba}$	– 2.900	$\text{Fe}^{2+} / \text{Fe}$	– 0.440	$\text{Cu}^{2+} / \text{Cu}$	0.337
$\text{Sr}^{2+} / \text{Sr}$	– 2.890	$\text{Cd}^{2+} / \text{Cd}$	– 0.400	Cu^+ / Cu	0.52
$\text{Ca}^{2+} / \text{Ca}$	– 2.870	$\text{Co}^{2+} / \text{Co}$	– 0.403	$\text{Hg}_2^{2+} / 2\text{Hg}$	0.790
Na^+ / Na	– 2.714	$\text{Ni}^{2+} / \text{Ni}$	– 0.250	Ag^+ / Ag	0.799
La^+ / La	– 2.370	$\text{Sn}^{2+} / \text{Sn}$	– 0.166	$\text{Pd}^{2+} / \text{Pd}$	0.830
$\text{Mg}^{2+} / \text{Mg}$	– 2.370	$\text{Pb}^{2+} / \text{Pb}$	– 0.126	$\text{Hg}^{2+} / \text{Hg}$	0.854
$\text{Al}^{3+} / \text{Al}$	– 1.700	$\text{Fe}^{3+} / \text{Fe}$	– 0.036	$\text{Pt}^{2+} / \text{Pt}$	1.20
				$\text{Au}^{3+} / \text{Au}$	1.500

Зі збільшенням значень E_0 окислювальна здатність іонів зростає, а відновна здатність атомів падає. Іншими словами, метали є хорошими відновниками, а їх іони – окислювачами.

Величина електродного потенціалу є основною характеристикою металу, за допомогою якої можна оцінити його хімічні властивості. Так, чим менше величина електродного потенціалу металу, тим метал легше віддає електрони, тим він хімічно більш активний, його відновна здатність більше, він легше окислюється і важче відновлюється:



Чим більше величина електродного потенціалу металу, тим легше іон металу відновлюється (приймає електрони) до вільного атома, тим вище його окислювальна здатність:



Величина електродного потенціалу металу залежить від природи металу, концентрації іонів електроліту, температури. Математично ця залежність виражається рівнянням Нернста:

$$E = E_0 + (RT/nF) \ln C,$$

де E – потенціал металу при даній концентрації іонів, В;

E_0 – стандартний електродний потенціал металу, В;

R – універсальна газова постійна (8,316 Дж/град моль);

T – абсолютна температура, К;

n – заряд іону металу;

F – число Фарадея (96500 Кл/моль);

C – концентрація (чи активність) іонів металу в розчині, М.

Прийнявши температуру рівною 25 °С і підставивши в рівняння Нернста всі константи, включаючи і коефіцієнт переведення натурального логарифма в десятковий (рівний 2,3), отримаємо:

$$E = E_0 + (0,059/n) \lg C. \quad (*)$$

Приклад 1. Визначити величину електродного потенціалу мідного електрода, зануреного в сантимольярний розчин сульфату міді.

За таблицею 1 знайдемо стандартний електродний потенціал міді: $E_0 (\text{Cu}^{2+} / \text{Cu}) = 0,34$ В. Концентрація іонів міді в сантимольярному розчині $C = 0,01 \text{ М} = 10^{-2} \text{ М}$. Підставляючи ці дані в рівняння Нернста, отримаємо:

$$E = 0,34 + (0,059 / 2) \lg 10^{-2} = 0,34 + (0,059 / 2) (- 2) = 0,28 \text{ В}.$$

Метал у цьому випадку заряджається позитивно, отже розчин в прилеглому до металу шарі заряджений негативно.

Приклад 2. Визначити величину електродного потенціалу цинкового електрода, зануреного в децимольярний розчин сульфату цинку.

За таблицею 1 знайдемо стандартний електродний потенціал цинку: $E_0 (\text{Zn}^{2+} / \text{Zn}) = - 0,76$ В. Концентрація іонів цинку в децимольярном розчині становить $C = 0,1 \text{ М} = 10^{-1} \text{ М}$. Підставляючи ці дані в рівняння Нернста, отримаємо:

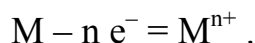
$$E = - 0,76 + (0,059 / 2) \lg 10^{-1} = - 0,76 - 0,028 = - 0,788 \text{ В}.$$

У даному випадку метал заряджений негативно, отже електроліт в прилеглому до металу шарі заряджається позитивно.

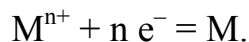
Таким чином, залежно від активності металу змінюється характер подвійного електричного шару, що виникає при зануренні металів в розчин своїх солей.

Гальванічний елемент – це прилад, що перетворює хімічну енергію в електричну. Конструктивно гальванічний елемент складається з двох різних металів (електродів), занурених у розчин електроліту і з'єднаних між собою провідником. Електролітом може служити розчин кислоти, лугу чи солі. Виникнення електричного струму в даному елементі обумовлено різницею потенціалів використовуваних металів і окисно-відновними реакціями, що протікають на електродах.

Звернемо увагу на назву електродів в гальванічному елементі. Метал, який має менший електродний потенціал буде електродом, що поставляє електрони в утворюваний ланцюг. Він є негативним полюсом і називається анодом. На аноді завжди йде процес окислення – віддачі електронів:



Метал, що має більший електродний потенціал, буде позитивним полюсом і називається катодом. На катоді завжди відбувається процес відновлення позитивно зарядженого іона (катіона) електроліту; наприклад:



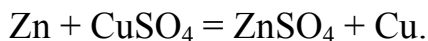
Розглянемо виникнення електричного струму в мідно-цинковій гальванічеському елементі. Перш за все слід визначити, який з металів (мідь або цинк) буде катодом, а який – анодом. За таблицею 1 знаходимо стандартні електродні потенціали даних металів:

$$E_0 (Zn^{2+} / Zn) = - 0,76 \text{ В}, E_0(Cu^{2+} / Cu) = 0,34 \text{ В}.$$

Так як $E_0 (Zn^{2+} / Zn) < E_0 (Cu^{2+} / Cu)$, значить, цинк буде виконувати функцію анода (-), а мідь – функцію катода (+). Тому на цинковому електроді буде відбуватися процес окислення: $Zn - 2e^- = Zn^{2+}$, а на мідному – відновлення: $Cu^{2+} + 2e^- = Cu$. В цьому разі електрони приймає не метал, а катіони електроліту, в який занурений катод; метали ж служать провідником електронів.

Іонна форма процесу, що протікає: $Zn + Cu^{2+} = Zn^{2+} + Cu$.

Молекулярна форма процесу, що протікає (за умови, що електроліт складається з розчинів сульфатів даних металів):



Зазвичай гальванічний елемент зображають короткої електрохімічної схемою, де одна риска означає кордон між електродом і розчином (іноді вказу-

ють їх концентрацію), дві риски – кордон між розчинами, в дужках показуються знаки електродів (полюсів):



Електрорушійну силу (ЕРС) обчислюють як різницю між електродними потенціалами катода і анода. ЕРС «працюючого» гальванічного елемента має бути позитивна; інакше електродні процеси йдуть у зворотному напрямку (відбувається переполюсовка електродів).

Приклад 3. Розрахувати ЕРС елемента, утвореного нікелевим електродом, зануреним в 0,01 М розчин сульфату нікелю, і мідним електродом, зануреним в 0,1 М розчин сульфату міді. Які процеси протікають на електродах? Перш за все слід записати схему гальванічного елемента:

так як $E_0(\text{Ni}/\text{Ni}^{2+}) = -0.25 \text{ В} < E_0(\text{Cu}/\text{Cu}^{2+}) = 0.34 \text{ В}$, то анодом буде нікель, а катодом – мідь:



Процес на аноді: $\text{Ni} - 2\text{e} = \text{Ni}^{2+}$ (окислення);

процес на катоді: $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e} = \text{Cu}$ (відновлення).

$\text{ЕРС} = E(\text{Cu}/\text{Cu}^{2+}) - E(\text{Ni}/\text{Ni}^{2+})$. Оскільки задані концентрації розчинів відмінні від 1 М, потрібно обчислити електродні потенціали нікелю та цинку, використовуючи рівняння Нернста (*).

$$E(\text{Ni}/\text{Ni}^{2+}) = E_0(\text{Ni}/\text{Ni}^{2+}) + (0.059/2)\lg 0.01 = -0.25 - 0.059 = -0.309 \text{ В}.$$

$$E(\text{Cu}/\text{Cu}^{2+}) = E_0(\text{Cu}/\text{Cu}^{2+}) + (0.059/2)\lg 0.1 = 0.34 - 0.029 = 0.311 \text{ В}.$$

$$\text{Звідси } \text{ЕРС} = 0,311 - (-0,309) = 0,620 \text{ В}.$$

3 ПОРЯДОК РОБОТИ

Дослід. Стан гальванічних елементів і дослідження впливу матеріалу електродів на ЕРС гальванічного елемента.

1. У спеціально підготовлені судини залити доверху 1М розчин сульфату цинку і 1М розчин сульфату міді.

2. У розчин сульфату цинку опустити цинковий електрод, а в розчин сульфату міді – мідний.

3. З'єднати провідником, заміряти ЕРС цього елемента, скласти його схему, записати процеси, що протікають на електродах.

4. Розрахувати ЕРС і порівняти з виміряним значенням.

5. Замінити послідовно спочатку мідний, а потім цинковий електроди на сталеві, алюмінієві (можна в довільній комбінації).

6. Виміряти ЕРС елементів, що утворюються. Порівняти теоретичні та практичні значення ЕРС, зробити висновки.

Результати дослідів занести в таблицю 2.

Таблиця 2

Матеріал електрода, його полярність	Електроліт	E_0 , В	Електродний процес	ЕРС		Схема елемента
				Теоретич.	Практич.	
Cu Zn						
Cu Fe						
Zn Fe						

4 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Як визначається електродний потенціал металу?
2. Ряд напруг металів. Зміна окисної і відновлюваної здібностей атомів залежно від величини електродного потенціалу.
3. Дано іони: міді, срібла, алюмінію, заліза. Який з іонів володіє найбільшою окисної здатністю? Розташуйте іони в порядку зростання їх відновної здатності.
4. Визначити, в якій парі елементів: Cr-Zn або Al-Fe слід чекати більшої ЕРС і чому? Вказати знаки електродів.
5. Скласти схеми двох гальванічних елементів, в одному з яких мідь була б анодом, а в іншому – катодом. Написати електродні процеси.

Зміст звіту з лабораторної роботи

Звіт щодо цієї лабораторної роботи має включати:

1. Найменування роботи і конспект теоретичного розділу (не менше 2-ох сторінок).
2. Креслення принципової схеми макета лабораторної роботи.
3. Для кожного етапу виконуваної роботи – найменування етапу і результати (у формі таблиць, графіків, замальовок осцилограм).
4. Короткі висновки з роботи.

Література

1. Глинка Н. Л. Общая химия. – Москва : Интеграл–пресс, 2002.
2. Курс общей химии /под ред. Н. В. Коровина. – Москва : Высшая школа, 1990.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК Li-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ

1 МЕТА РОБОТИ

Ознайомитися з улаштуванням, принципом дії та характеристиками Li-ion акумуляторів.

2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Хімічні процеси Li-ion акумуляторів

Революцію у розвитку літієвих акумуляторів, що перезаряджаються, справило повідомлення про те, що в Японії розроблені акумулятори з негативним електродом з вуглецевих матеріалів. Вуглець виявився досить зручною матрицею для інтеркаляції літію.

При розряді Li-ion акумулятора відбуваються деінтеркаляція літію з вуглецевого матеріалу (на негативному електроді) і інтеркаляція літію в оксид (на позитивному електроді). При заряді акумулятора процеси йдуть у зворотному напрямку. Отже у всій системі відсутній металевий (нуль-валентний) літій, а процеси розряду і заряду зводяться до переносу іонів літію з одного електрода на інший. Тому такі акумулятори отримали назву "літій-іонних", або акумуляторів типу крісла-гойдалки.

Процеси на негативному електроді Li- іон акумулятора

У всіх Li- іон акумуляторах, доведених до комерціалізації, негативний електрод виготовляють з вуглецевих матеріалів. Інтеркаляція літію в вуглецеві матеріали представляє собою складний процес, механізм і кінетика якого в істотному ступені залежать від природи вуглецевого матеріалу і природи електроліту.

Вуглецева матриця, яка застосована в якості анода, може мати впорядковану шарувату структуру, як у природного або синтетичного графіту, неупорядковану аморфну або хаотично впорядковану (кокс, піролізний або мезофазних вуглець, сажа та ін.). Іони літію при включенні розсовують шари вуглецевої ма-

триці і розташовуються між ними, утворюючи інтеркалати різноманітних структур. Питомий обсяг вуглецевих матеріалів у процесі інтеркаляції – деінтеркаляції іонів літію змінюється незначно.

Крім вуглецевих матеріалів як матриці негативного електрода, вивчаються структури на основі олова, срібла та їх сплавів, сульфідів олова, фосфориди кобальту, композити вуглецю з наночастинками кремнію.

Процеси на позитивному електроді Li- іон акумулятора

Якщо в первинних літійових елементах застосовують різноманітні активні матеріали для позитивного електрода, то в літійових акумуляторах вибір матеріалу позитивного електрода обмежений. Позитивні електроди літій-іонних акумуляторів створюються виключно з літірованих оксидів кобальту або нікелю і з літій-марганцевих шпинелей.

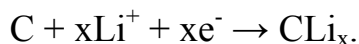
В теперішній час в якості катодних матеріалів все частіше застосовують матеріали на основі змішаних оксидів або фосфатів. Показано, що з катодами зі змішаних оксидів досягаються найкращі характеристики акумулятора. Освоюються і технології покриттів поверхні катодів тонкодисперсними оксидами.

При заряді Li-іон акумулятора відбуваються реакції:

на позитивних пластинах:



на негативних пластинах:



При розряді відбуваються зворотні реакції. Процес заряду демонструється рисунком один.

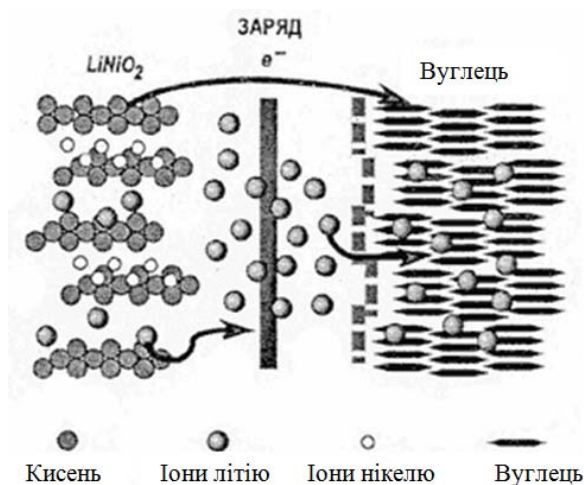


Рисунок 1 – Процес заряду літій-іонного (Li-ion) акумулятора

Конструкція Li- іон акумуляторів

Конструктивно Li-іон акумулятори, як і лужні (Ni-Cd, Ni-MH), виробляються в циліндричному і призматичному варіантах. В циліндричних акумуляторах згорнутий у вигляді рулону пакет електродів і сепаратора розміщено в сталевий або алюмінієвий корпус, з яким з'єднаний негативний електрод. Позитивний полюс акумулятора виведений через ізолятор на кришку (рис. 2).

Призматичні акумулятори виробляються складанням прямокутних пластин один на одного. Призматичні акумулятори забезпечують більш щільну упаковку в акумуляторній батареї, але в них важче, ніж в циліндричних, підтримувати стискаючі зусилля на електроди. У деяких призматичних акумуляторах застосовується рулонна збірка пакету електродів, який скручується в еліптичну спіраль (рис. 3). Це дозволяє об'єднати переваги двох описаних вище модифікацій конструкції.

Деякі конструктивні заходи зазвичай робляться і для попередження швидкого розігріву і забезпечення безпеки роботи Li-іон акумуляторів. Під кришкою акумулятора є пристрій, що реагує на позитивний температурний коефіцієнт збільшення опору, і інше, яке розриває електричний зв'язок між катодом і позитивною клемою при підвищенні тиску газів усередині акумулятора вище допустимого рівня.

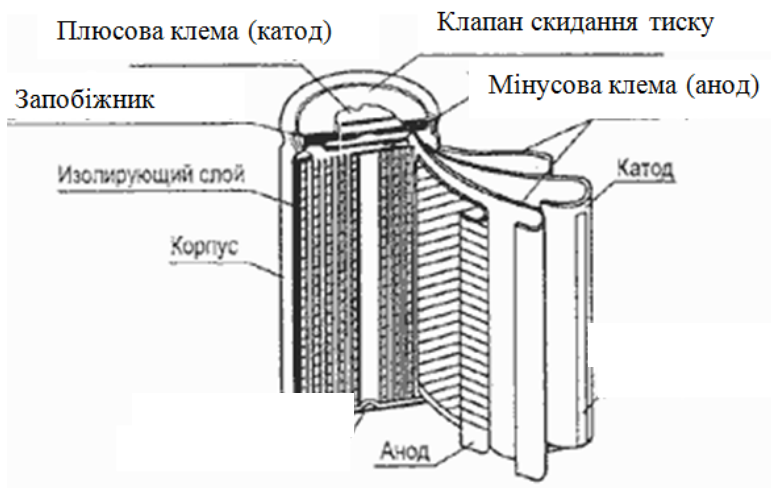


Рисунок 2 – Устрій літій-іонного (Li-ion) акумулятора



Рисунок 3 – Устрій призматичного літій-іонного (Li-ion) акумулятора з рулонною скруткою електродів

Для підвищення безпеки експлуатації Li- іон акумуляторів у складі батареї обов'язково застосовується також і зовнішній електронний захист, мета якого не допустити можливість перезаряду і перерозряду кожного акумулятора, короткого замикання і надмірного розігріву.

Різноманітні електроди в літієвих і літій-іонних акумуляторах поділяються сепаратором з пористого поліпропілену.

Конструкція Li-ion та інших літієвих акумуляторів, як і конструкція всіх первинних джерел струму ("батарейок") з літієвим анодом, відрізняється абсолютною герметичністю. Вимога абсолютної герметичності визначається як неприпустимістю витікання рідкого електроліту (негативно діє на апаратуру), так і неприпустимістю попадання в акумулятор кисню і парів води з навколишнього середовища. Кисень і пари води реагують з матеріалом електродів і електроліту і повністю виводять акумулятор з ладу.

Характеристики Li-ion акумуляторів

Сучасні Li-ion акумулятори мають високі питомі характеристики: 100-180 Вт-год / кг і 250-400 Вт- год /л. Робоча напруга – 3,5-3,7 В.

Заряд Li-ion акумуляторів

Li-ion акумулятори заряджаються в комбінованому режимі: спочатку при постійному струмі (в діапазоні від 0,2 С до 1 С) до напруги 4,1-4,2 В (залежно від рекомендацій виробників), далі при постійній напрузі.

Перша стадія заряду може тривати близько 40 хв, друга стадія довше. Більш швидкий заряд може бути досягнутий при імпульсному режимі.

Li-ion акумуляторні батареї промислового та військового призначення мають більший термін служби, ніж батареї для комерційного використання. Тому для них порогова напруга кінця заряду становить 3,90 В на елемент. Хоча енергетична щільність (кВтг / кг) у таких батареях нижча, підвищений термін служби при невеликих розмірах, малій вазі і більш висока в порівнянні з батареями інших типів енергетична щільність ставить Li-ion батареї поза конкуренцією.

При заряді Li-ion акумуляторних батарей струмом 1С час заряду становить 2-3 ч. Li-ion батарея досягає стану повного заряду, коли напруга на ній стає рівною напрузі відсічення, а струм при цьому значно зменшується і складає приблизно 3% від початкового струму заряду (рис. 4).

3 ПОРЯДОК РОБОТИ

Дослід. З'ясування складу (Li-ion) акумулятора і дослідження його зарядних характеристик.

1. У спеціально підготовленому препарованому (Li-ion) акумуляторі визначити конструкцію електродів.
2. На основі матеріалів лабораторної роботи №5 скласти схему (Li-ion) акумулятора, записати процеси, що протікають на електродах (табл. 1).
3. Розрахувати ЕРС і порівняти з вимірним значенням.
4. Побудувати графік залежності напруги і струму від часу при заряді літій-іонного (Li-ion) акумулятора.

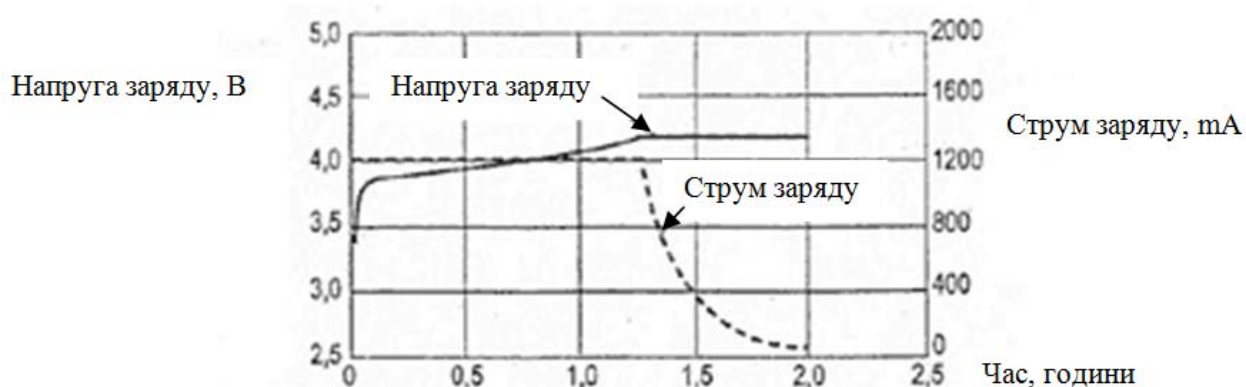


Рисунок 4 – Залежність напруги і струму від часу при заряді літій-іонного (Li-ion) акумулятора

Результати дослідів занести в таблицю 1.

Таблиця 1

Матеріал електрода, його полярність	Електроліт	E_0 , В	Електродний процес	ЕРС		Схема елемента
				Теоретич.	Практич.	

4 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. В якій формі застосовується Li в (Li-ion) акумуляторі?
2. Які процеси протікають при заряді (Li-ion) акумулятора?
3. Які переваги мають (Li-ion) акумулятори?
4. Які недоліки мають (Li-ion) акумулятори?

Зміст звіту щодо лабораторної роботи

Звіт щодо лабораторної роботи повинен включати:

1. Найменування роботи і конспект теоретичного розділу (не менше 2-ох сторінок).
2. Креслення принципової схеми (Li-ion) акумулятора.
3. Для кожного етапу виконуваної роботи – це найменування етапу і результати (у формі таблиць, графіків, замальовок осцилограм).
4. Короткі висновки з роботи.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЄМНІСНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

1 МЕТА РОБОТИ

Ознайомитися з будовою, принципом дії та характеристиками ємнісних накопичувачів електричної енергії.

2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Високовольтні генератори потужних імпульсів включають в себе, як правило, накопичувач енергії, систему множення (трансформації) напруги, систему комутації та управління. В якості накопичувача енергії в них найчастіше використовуються ємнісні і індуктивні накопичувачі. Збільшення напруги може досягатися різними способами: наприклад, перемиканням елементів накопичувача з паралельного на послідовне, використанням імпульсного трансформатора, різким обривом зарядного струму індуктивного накопичувача. Як комутатори використовуються іскрові розрядники, газорозрядні лампи, тиратрони та напівпровідникові комутатори. Обрив струму здійснюється розмикачем струму, такими як плазмові розмикачі, розмикачі на основі електричного вибуху провідників, вакуумні та ін.

Високовольтні генератори потужних імпульсів підрозділяються на генератори імпульсних напруг (ГІН) і генератор імпульсних струмів (ГІС).

Генератор імпульсної високої напруги (генератор Аркадьева-Маркса рис. 1) – це пристрій принцип дії якого базується на зарядці електричним струмом з'єднаних паралельно (через резистори) конденсаторів, які після зарядки з'єднуються послідовно за допомогою різних комутуючих пристроїв (наприклад газових розрядників або тригатронів). Таким чином, вихідна напруга збільшується пропорційно кількості з'єднаних конденсаторів.

Після зарядки конденсаторів запуск генератора зазвичай проводиться після спрацювання першого розрядника (на рисунку позначеного як trigger (триггер, рис. 2)).

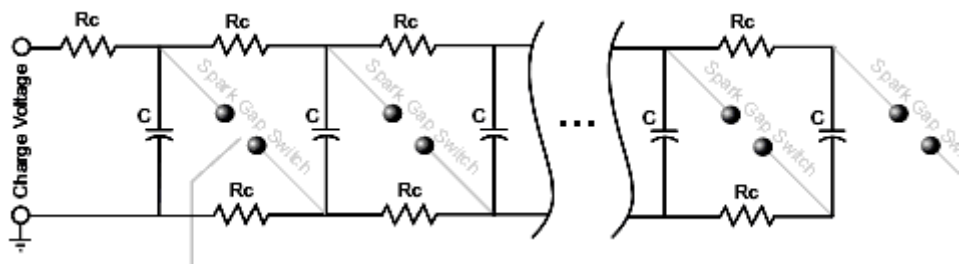


Рисунок 1 – Принципова схема ГІН (стадія заряду)

Після спрацювання триггера перенапряга на розрядниках змушує спрацювати всі зарядники практично одночасно, чим і здійснюється послідовне з'єднання заряджених конденсаторів.

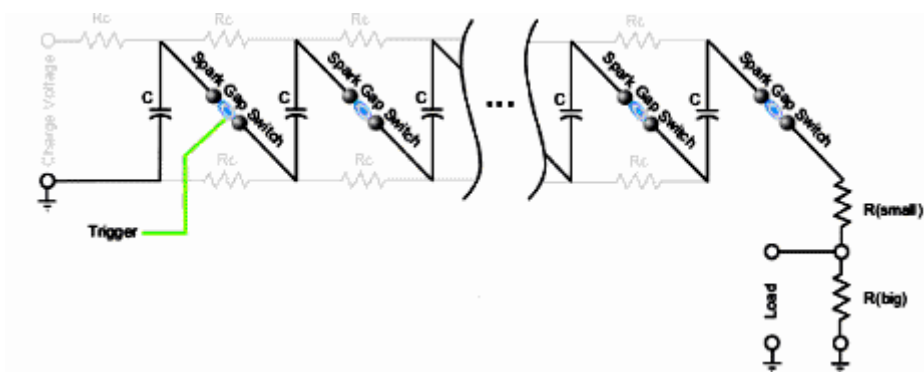


Рисунок 2 – Принципова схема ГІН (стадія розряду)

Генератори Маркса дозволяють отримувати імпульсні напруги від десятків кіловольт до декількох мільйонів і до десятка мільйонів вольт (рис. 3).

Частота імпульсів, сформованих генератором Маркса залежить від потужності генератора в імпульсі – від одиниць імпульсів на годину до декількох десятків герц.

Енергія в імпульсі генераторів Маркса широко варіюється і може починатися від величин в десяті частини джоуля і досягати величин в десятки мегаджоулей.

У деяких установках об'єднують два генератора Маркса в єдину установку в якій багатоступінчастий ГІН з конденсаторами невеликої загальної ємності забезпечує високий потенціал напруги, що необхідний для розвитку розряду основного ступеня ГІС з конденсаторами великої спільної ємності, з порівняно невисоким потенціалом, але великою силою струму в тривалому імпульсі.

Генератор імпульсних струмів є джерелом високовольтних імпульсів струму і призначений для підвищення мережевої напруги з подальшим його випрямленням і зарядкою високовольтних імпульсних конденсаторів, комутації енергії, що запасється в електричному полі конденсаторів.



Рисунок 3 – Зовнішній вигляд генератора імпульсів напруги

Ємнісні накопичувачі енергії широко використовують у фізичних експериментах і у виробничій сфері завдяки ряду переваг.

Головною з них є малий внутрішній опір (10^{-3} Ом і нижче) і індуктивність (до 10^{-9} Гн), що дозволяє забезпечити малий час заряду (10^{-4} - 10^{-8} с), високу ефективність передачі енергії в навантаження, можливість досягнення рекордних значень потужності (до 10^{13} Вт) і швидкості наростання струму (вище 10^{13} А/с). Крім того, ємнісні накопичувачі мають ряд зручностей (відсутність рухомих елементів, простота обслуговування, модульний принцип побудови).

Конструктивно ГІС являє собою корпус з верхньою кришкою, бічними дверима і панеллю керування. Ці елементи конструкції виконані зі сталі і є надійним захисним екраном від впливу імпульсних магнітних полів на навколишнє середовище. До складу ГІСа входять (рис. 4): випрямляч – трансформатор, клемники, дверний кінцевий вимикач, електромагніт з приводною тягою замикачів, блокування, розрядник і ємнісні накопичувачі, які з'єднані шинами і кабельними розділками згідно зі схемою електричною принциповою.

Випрямляч-трансформатор призначений для підвищення і випрямлення вхідної напруги і являє собою металевий бак, в якому знаходяться підвищувальний трансформатор, випрямляч і струмообмежуючі дроселі. Випрямляч-трансформатор заповнений трансформаторним маслом.

Розрядник призначений для комутації енергії, яка накопичується в конденсаторах ємнісного накопичувача в навантаження. Розрядник являє собою основу з встановленими на ньому двома опорними високовольними ізоляторами,

на яких розміщені два металеві електроди (у формі торів) з можливістю регулювання зазору між ними.



Рисунок 4 – Зовнішній вигляд генератора імпульсів струмів

Робота генератора під навантаженням забезпечується системою управління, розробленої відповідно до вимог входних параметрів схеми електричної принципової.

Цикл роботи генератора може бути розбитий на три етапи:

- підготовка пустка генератора;
- пуск і робота генератора;
- виключення генератора.

Постійний зарядний струм з виходу випрямляча-трансформатора по високовольтному кабелю через водний проміжок технологічного вузла (бак-електрод) заряджає конденсатори ємнісного накопичувача. При досягненні заданої зарядної напруги на конденсаторах спрацьовує розрядник, напруга спрацьовування якого залежить від зазору між його електродами і встановлюється по тарировочній кривій розрядника. При цьому енергія, накопичена в конденсаторах ємнісного накопичувача через високовольтні шлейфи комутується в навантаження.

Енергія зарядженого конденсатора

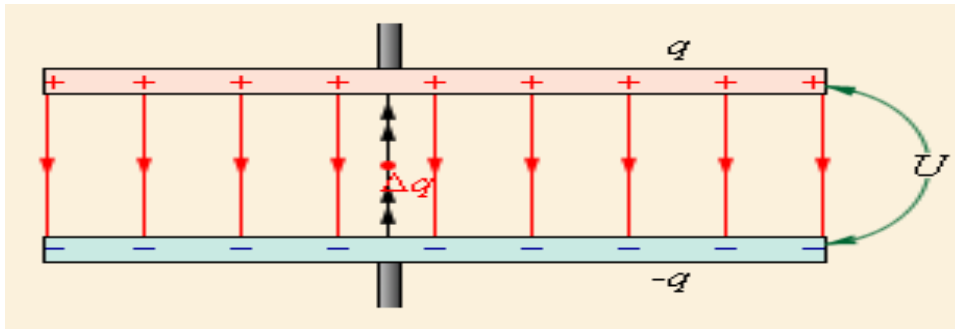
Енергію конденсатора, яка зосереджується в електричному полі поміж обкладинками конденсатора, розраховують за формулою:

$$W_{\bullet} = \frac{Q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2} = \frac{QU}{2}$$

де Q – заряд конденсатора, Кулон;

C – ємність конденсатора, фарад;

U – напруга на обкладинках, В.



3 ПОРЯДОК РОБОТИ

Дослідити роботу імпульсних генераторів напруги та струму.

1. Скласти схему імпульсного генератора напруги.
2. Скласти схему імпульсного генератора струму.
3. Розрахувати енергію заряджених конденсаторів генератора напруги.
4. Розрахувати енергію заряджених конденсаторів генератора струму.
5. Розрядити конденсатори генераторів напруги та струму через розрядний проміжок та через провідник відповідно. Спостерігати за проявом виділення енергії при розрядах. Зробити висновки щодо характеристик розряду.

4 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. В якій формі застосовується ємнісні генератори?
2. Як сполучаються конденсатори в імпульсному генераторі напруги?
3. Як сполучаються конденсатори в імпульсному генераторі струму?
4. Які недоліки мають імпульсні генератори електричної енергії?

Зміст звіту щодо лабораторної роботи

Звіт згідно лабораторної роботи має включати:

1. Найменування роботи і конспект теоретичного розділу (не менше 2-ох сторінок).
2. Креслення принципової схеми імпульсного генератора напруги.
3. Для кожного етапу виконуваної роботи – найменування етапу і результати (у формі таблиць, графіків, замальовок осцилограм).
4. Короткі висновки з роботи.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНІЧНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

1 МЕТА РОБОТИ

Ознайомитися з будовою, принципом дії та характеристиками механічних накопичувачів енергії.

2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Маховик являє собою масивне колесо, що обертається, використовуване як накопичувач енергії. Найпростіший приклад маховика можна розглянути при грі з дитячою інерційною машинкою, яка рухається, як у казці, абсолютно самостійно. Її колеса приводяться в рух саме тим самим маховиком, що використовує нерівномірне надходження енергії. Іншими словами, маховик акумулює енергію, коли її прихід більше, ніж витрата, і віддає її, коли надходження енергії скорочується або припиняється зовсім.

При розгоні маховика передається енергія приводу, що перевищує в той момент витрату енергії. Якщо потім машинку поставити на рівну поверхню і не перешкоджати її руху, вона може проїхати чималу відстань.

Ідея використовувати принцип цього пристрою викликала інтерес з моменту появи питання про накопичення енергії про запас. Але серйозною перешкодою на шляху широкого застосування маховиків стало невелика кількість накопичуваної енергії, а також занадто малий ККД пристрою.

Перші серйозні результати в цьому напрямку були отримані в середині минулого століття професором Н. В. Гуліа, що запропонував абсолютно новий тип маховика, який дозволяє накопичувати кількість енергії, достатню для використання в подальшому. Він запропонував використовувати в якості маховика не звичний диск, а сердечник з намотаним на нього дуже тонким металевим дротом.

Підвищити ККД і зменшити втрати енергії на тертя вдалося після розміщення цього пристрою у вакуумі. Надалі сталевий дріт було замінено на пластикову стрічку, міцну і тонку. В ході дослідів було встановлено, що такий маховик може накопичити достатньо велику кількість енергії, віднесеної до одиниці ваги даного пристрою.

Запас енергії маховика може бути знайдений за формулою:

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2,$$

де: I – момент інерції тіла, що обертається;

ω – кутова швидкість обертання.

Для простих форм маховика, відомі кінцеві вирази моменту інерції.

Для порожнього циліндра:

$$I = \frac{1}{2} m (r^2 + r_o^2),$$

де: m – маса порожнього циліндра;

r – зовнішній радіус циліндра;

r_o – внутрішній радіус циліндра.

Для тонкостінного циліндра, внутрішнім радіусом якого можна знехтувати

$$I = m r^2$$

Замінивши у формулі для полого циліндра, кутову швидкість ω – на частоту обертання – S за формулою:

$$\omega = 2\pi S,$$

отримаємо

$$E = m (\pi S)^2 (r^2 + r_o^2).$$

Запас накопиченої маховиком енергії залежить від граничної швидкості його обертання.

Професор Гуліа бачив перспективу використання маховиків для накопичувача енергії на транспорті. Питання акумуляції енергії та зберігання її ним не розглядалися, ймовірно, з тієї причини, що в той час питання альтернативної енергетики не було настільки актуальним, як сьогодні.

Сучасні маховики

Ідея акумуляції енергії за допомогою маховиків отримала свій розвиток вже в цьому столітті. Яскравим прикладом може слугувати будівництво комплексу з використанням маховиків, розрахованих на підключення до електричних мереж, в Америці компанією «Beacon Power». Вони зроблені з композитних матеріалів, що мають величезну кількість шарів і здатні витримувати високі механічні навантаження. Швидкість обертання маховика може досягати 22 000 обертів на хвилину. Розташований такий маховик у вакуумі на спеціальних електромагнітних підвісках.

Маховик розкручується при наявності неживаної енергії, одержуваної від вітрогенераторів і сонячних батарей, накопичуючи її. Потім, коли надходження енергії припиняється, він передає енергію генератору, що виробляє електричну енергію. Розробники вважають цей пристрій перспективним і проорокують йому велике майбутнє.

Накопичувач кінетичної енергії (НКЕ)

НКЕ виготовлено за класичною схемою, яка включає в собі маховик, який перебуває в міцному корпусі. Площина обертання маховика – горизонтальна, що зумовило ряд прийнятих в даному виконанні конструктивних рішень. Вал маховика виходить з корпусу у верхній кришці, до якої приєднаний фланець, що тримає на собі електродвигун фланцевого виконання. Вали маховика і електромотора розташовані співвісно і з'єднані муфтою.

Застосована електромашина є оборотною, тобто може працювати як в режимі електродвигуна, так і в режимі генератора. Розкручений до своїх робочих швидкостей маховик накопичує енергію. При досягненні максимальної робочої частоти обертання, на яку розрахований маховик, електромотор відключається від мережі. Після цього маховик обертається за інерцією. При включенні електромашини в режимі генератора завдяки тому, що ротор генератора з'єднаний муфтою з валом маховика і обертається, виробляється напруга, яка передається на навантаження.



3 ПОРЯДОК РОБОТИ

Дослідити роботу маховикового накопичувача енергії.

1. Перевірити схему підключення двигуна, генератора та приладів вимірювання.
2. Запустити двигун для розгону маховика (ротора генератора). Розігнати маховик генератора до номінальних оборотів.
3. Виміряти за допомогою секундоміра час вибігу ротора генератора.
4. Розрахувати кінетичну енергію маховика (ротора генератора).

4 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. В якій формі застосовується інерційні накопичувачі енергії?
2. З яких матеріалів виготовляють маховики сучасних інерційних накопичувачів енергії?
3. Які механізми застосовують для передачі енергії від маховика до генератора і навпаки?
4. Які переваги та недоліки мають інерційні накопичувачі енергії?

Зміст звіту щодо лабораторної роботи

Звіт щодо лабораторної роботи має включати:

1. Найменування роботи і конспект теоретичного розділу (не менше 2-ох сторінок).
2. Креслення принципової схеми інерційного накопичувача енергії.
3. Для кожного етапу виконуваної роботи – найменування етапу і результати (у формі таблиць, графіків, замальовок осцилограм).
4. Короткі висновки з роботи.

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
для виконання лабораторних робіт
з дисципліни

ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

*(для студентів 1, 2 курсів денної, 2 курсу заочної форм навчання за
напрямом підготовки 6.050701 – Електротехніка та електротехнології
та слухачів другої вищої освіти
зі спеціальності «Електротехнічні системи електроспоживання»)*

Укладачі: **МАЛЯРЕНКО** Віталій Андрійович,
ДОЦЕНКО Сергій Ілліч,
ТЕМНОХУД Інна Олександрівна

Відповідальний за випуск *О. М. Ляшенко*

Редактор З. І. Зайцева

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2014, поз. 184М

Підп. до друку 24.12.2014 р.
Друк на ризографі
Зам. №

Формат 60х84/16
Ум. друк. арк. 3,5
Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Революції, 12, Харків, 61002
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 4705 від 28.03.2014 р.